

UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA

ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES



**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT
SEGWAY”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO Y
TELECOMUNICACIONES**

**MORALES INOÑAN JOSE LUIS
GOMEZ BUSTAMANTE JOSE ALEJANDRO**

Piura, 2016

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT SEGWAY”

TESIS PRESENTADA A LA FACULTAD DE CIENCIAS COMO

REQUISITO PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

ING. ELECTRÓNICO Y TELECOMUNICACIONES

Bch. MORALES INOÑAN JOSE LUIS
EJECUTOR

Bch. GOMEZ BUSTAMANTE JOSE A.
EJECUTOR

Ing. JUAN M. JACINTO SANDOVAL
ASESOR

APROBADA POR:
JURADO:

ING. FRANKLIN BARRA ZAPATA
PRESIDENTE

ING. CARLOS ARELLANO RAMIREZ
SECRETARIO

ING. MARIO RAMOS ECHEVARRÍA
VOCAL

PIURA – PERÚ
2016

DEDICATORIA:

Este esfuerzo y empeño se lo dedico a DIOS mi creador y a su hijo Jesucristo por no abandonarme nunca en mis caminos de la vida, sus bendiciones a través de mis padres y familiares me permiten permanecer unidos para bien y seguir surgiendo junto a ellos y para ellos.

JOSE LUIS MORALES INOÑAN

DEDICATORIA:

Dedico este trabajo a mi familia en especial a mis padres y a mi hijo porque ellos son la motivación de seguir esforzándome, también agradezco a DIOS por darme esta oportunidad de haber concluido mi carrera y por último a todas las personas que me brindaron su apoyo, para todos ellos dedico este trabajo.

JOSE ALEJANDRO GOMEZ BUSTAMANTE

AGRADECIMIENTO

A DIOS primeramente por la salud y por permitirnos que día a día podamos seguir forjando nuestro futuro junto a él.

Durante el transcurso del desarrollo de nuestra tesis y al aplicar los conocimientos obtenidos y brindados gracias a los ingenieros que influyeron en nuestra formación expresamos gran gratitud para ellos y para nuestros familiares que sin duda alguna estuvieron siempre presente para nosotros.

Agradecemos al Ing. JUAN M. JACINTO SANDOVAL por el apoyo incondicional en el asesoramiento de esta tesis fomentando la investigación.

Agradecemos a todas las personas que de alguna manera nos brindaron su apoyo y contagiaron sus ganas de emprender y alcanzar el éxito propuesto por nuestros objetivos y metas trazadas.

INTRODUCCIÓN

Entre las alternativas modernas de transporte de pasajeros orientadas a tramos cortos se cuenta un tipo de vehículo cuyo funcionamiento está basado en el equilibrio humano. Se trata de un vehículo eléctrico que aunque no haya alcanzado introducirse en la sociedad actual como medio de transporte, presenta unas características muy adecuadas al uso por la ciudad debido a su tamaño y maniobrabilidad. Además se encuentra su componente ecológica, ya que funciona íntegramente con energía eléctrica, lo cual disminuiría en consideración la contaminación producida por los coches en las grandes ciudades.

Se espera que conforme se desarrollen nuevas y mejores estrategias de control y componentes más económicos, la proliferación de sistemas robóticos se incremente y ocupen un lugar más prominente como herramientas para la automatización de tareas indeseables, peligrosas o repetitivas para los seres humanos.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consistió en el desarrollo e implementación en tiempo real de un algoritmo de control para un prototipo de plataforma de dos ruedas. El dispositivo móvil tiene controladores (drivers) para manejar de forma independiente los motores de las ruedas y dos sensores, un acelerómetro y un giroscopio, mediante los cuales se obtendrá la información para el cálculo del ángulo de inclinación de la plataforma, parámetro que cerrará el lazo de control. Durante el desarrollo del trabajo se probaron distintos algoritmos los cuales se describen en este documento. Para lograr el objetivo del proyecto, se implementó un controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) con filtros complementarios a fin de disponer de la información precisa, a partir de la combinación de ambos sensores, para alcanzar el equilibrio y estabilidad de la plataforma móvil.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	5
RESUMEN.....	6
CAPITULO I.....	12
1.1 DELIMITACION DEL PROBLEMA.....	13
1.2 ANTECEDENTES.....	13
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	14
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.5 HIPÓTESIS	14
CAPITULO II.....	15
2 MARCO TEÓRICO	16
2.1 ROBOTS MOVILES	16
2.2 CONTROL DE UN ROBOT	16
2.3 MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA	17
2.3.1 ROTOR.....	19
2.3.2 ESTATOR.....	21
2.4 MICROCONTROLADOR.....	22
2.5 ARDUINO	24
2.6 PUENTE H.....	28
2.7 PWM.....	32
2.8 BATERÍAS	33
2.8.1 TIPOS DE BATERIA	34
2.9 SENSORES	39
2.9.1 ESTIMACION DEL ANGULO	40
2.9.2 ACELEROMETRO COMO SENSOR DE INCLINACIÓN	41
2.10 GIROSCOPIO ELECTRÓNICO COMO SENSOR DE INCLINACIÓN	43
2.10.1 CARACTERÍSTICAS DE SELECCIÓN DE LOS SENSORES	46

2.10.2	IMU.....	49
2.10.3	ACELERÓMETRO	50
2.10.4	GIRÓSCOPO	51
2.11	CONTROL AUTOMÁTICO DE SISTEMAS	52
2.11.1	ACCIÓN PROPORCIONAL.....	55
2.11.2	ACCIÓN INTEGRAL	56
2.11.3	ACCIÓN DERIVATIVA.....	56
CAPITULO III.....		60
3	MATERIAL Y MÉTODOS	61
3.1	DISEÑO DEL ROBOT.....	61
3.2	ESTRUCTURA FÍSICA DEL ROBOT	61
3.3	ARDUINO UNO.....	62
3.4	ESTRATEGIA DE CONTROL	63
3.5	MPU6050	67
3.5.1	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.	67
3.5.2	COMUNICACIÓN I2C.	69
3.6	CONTROLADOR PID.....	70
3.7	ETAPA DE POTENCIA	70
3.8	FILTRO COMPLEMENTARIO	72
CAPITULO IV.....		75
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	76
CAPITULO V.....		82
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		85
ANEXOS		86

INDICE DE FIGURAS

FIG. 1 ROTOR DEL MOTOR	18
FIG. 2 ESTATOR DEL MOTOR	19
FIG. 3 PARTES DEL ROTOR	20
FIG. 4 PARTES DEL ESTATOR	21
FIG. 5 COMPONENTES BÁSICOS PRESENTES EN UN MICROCONTROLADOR	24
FIG. 6 ARDUINO LOGO	24
FIG. 7 PÁGINA WEB ARDUINO	26
FIG. 8 UBICACIÓN DE LOS CONMUTADORES O TRANSISTORES, FORMADO UNA H28	
FIG. 9 FLUJO DE LA CORRIENTE A TRAVÉS DE LOS CONMUTADORES O	
TRANSISTORES Y EL MOTOR	29
FIG. 10 LOS INTERRUPTORES REEMPLAZADOS POR TRANSISTORES MOSFET	
DENTRO DEL PUENTE H Y LA CIRCULACIÓN DE CORRIENTE PARA LOGRAR	
LOS DOS SENTIDOS DE GIRO.	30
FIG. 11 SEÑAL DE PWM A LA QUE SE LE HA CAMBIADO EL CICLO DE TRABAJO.	32
FIG. 12 CONTROL DE VELOCIDAD CON EL PWM.	33
FIG. 13 ÁNGULOS DE INCLINACIÓN QUE PERMITE LEER UN IMU.	40
FIG. 14 DESCOMPOSICIÓN DE LA GRAVEDAD EN LOS EJES X, Y.	42
FIG. 15 ROTACIÓN DEL VEHÍCULO RESPECTO LAS RUEDAS.	45
FIG. 16 IMU MPU6050 SPARKFUN	50
FIG. 17 ACELERÓMETRO MEMS	51
FIG. 18 GIRÓSCOPO MEMS	52
FIG. 19 DIAGRAMA TÍPICO DE UN SISTEMA DE CONTROL RETROALIMENTADO	52
FIG. 20 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR PID	54
FIG. 21 ELEMENTOS DESTACADOS DEL ARDUINO UNO.	63
FIG. 22 PROCESO DE CONTROL IMPLEMENTADO PARA UNA PLATAFORMA MÓVIL	64
FIG. 23 DIAGRAMA DE CONTROLADOR PID	65

FIG. 24 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE CONTROL IMPLEMENTADO PARA EL EQUILIBRIO Y EL BALANCE DE UNA PLATAFORMA DE DOS RUEDAS	66
FIG. 25 MPU6050	68
FIG. 26 PUENTE H BTS7960 DE 43A	71
FIG. 27 DIAGRAMA FILTRO COMPLEMENTARIO	73
FIG. 28 EXPLICACIÓN GRAFICA DEL EFECTO WINDUP	77
FIG. 29 CONEXIONADO DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS QUE CONFORMAN EL SEGWAY.....	79
FIG. 30 AJUSTE DE PARÁMETROS DE PID	80

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 COMPARACIÓN GENERAL DE LOS CONTROLADORES P, PI Y PD.....	59
--	----

CAPITULO I

1.1 DELIMITACION DEL PROBLEMA

Esta investigación está comprendida en la localidad de Piura, Universidad Nacional de Piura, Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.

La investigación se basa en muchas aplicaciones que se están solucionando con diferentes métodos de control.

Esta investigación abarca conceptos fundamentales como lo es robótica y sensores de orientación. Los motores que se utilizarán serán de corriente directa. Es un modelo a escala, con fines educativos.

1.2 ANTECEDENTES

En la revista científica U.D.C.A 12/2014; 17(2):541-551 hay un artículo de Alvaro Romero, de la Universidad Nacional de Colombia, "Sistema de monitoreo y control para un robot autobalanceado sobre dos ruedas modelado en 3D" donde se desarrolla El diseño y el control de robot autobalanceado sobre dos ruedas es constituido como un importante avance tecnológico para la movilidad de transporte urbano del futuro, por lo tanto, es una alternativa viable de solución al sistema de transporte inteligente (ITS). Este robot es considerado, en particular, como un problema de excelente referencia para los estudios de control, debido a la tarea compleja de mantener en equilibrio su estructura, por consiguiente, se elabora un sistema realimentado de monitoreo y de control en tiempo real, basado en una red inalámbrica, para sintonizar su punto de equilibrio y verificar el funcionamiento del sistema, por medio de la integración del

protocolo ZigBee (estándar IEEE 802.15.4), con el entorno gráfico de programación LabVIEW, con un modelado 3D, que permite visualizar la dinámica del movimiento en el robot. En este artículo, se presenta un prototipo del robot auto balanceado, con la característica de ser un vehículo remoto, para la gestión de movilidad en espacios reducidos.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un robot segway utilizando un controlador clásico, como el PID (control Proporcional, Integral y Derivativo).

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Capturar y procesar las señales adquiridas por los sensores.
- ✓ Analizar los algoritmos a implementar como el PID.
- ✓ Analizar e implementar el diseño mecánico.
- ✓ Encontrar los parámetros adecuados para sintonizar el PID.

1.5 HIPÓTESIS

Utilizando el controlador clásico como el PID (control Proporcional, Integral y Derivativo) será posible diseñar e implementar un robot segway.

CAPITULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 ROBOTS MOVILES

Los robots móviles son robots que tienen la capacidad de moverse en un determinado ambiente sin necesidad de estar completamente fijos en un espacio físico específico. En contraste con los robots industriales los cuales consisten, por lo general, en un brazo articulado y una pinza que se encuentra unida a una superficie fija.

Las primeras generaciones de robots se trataban de mecanismos con sistemas de control sencillos que realizaban funciones o acciones con una secuencia específica y presentaban una movilidad limitada.

El desarrollo en robótica se ha estado dirigiendo a atender o solventar necesidades cotidianas del ser humano para mejorar su calidad de vida. Particularmente en la vida moderna del siglo XXI el bienestar alcanzado por las sociedades y por los individuos ha sido apoyada por el desarrollo y aplicaciones logradas en el área de la robótica. Se puede señalar que esta ciencia ha contribuido, y lo sigue haciendo, en la ejecución de las actividades de los seres humanos en todos sus ámbitos, industriales, científicas, comerciales, domésticas, investigación, educativas, deportivas, esparcimiento, etc.

2.2 CONTROL DE UN ROBOT

A partir de la explicación anterior se podría llegar a la conclusión que un robot autónomo no necesita ningún tipo de control externo. Aun así, es importante destacar la presencia de distintos niveles de control en un robot.

Se requiere una forma de „control avanzado" para controlar una máquina no lineal en interacción con los seres humanos. Este tipo de control es importante para asegurar que el robot no afecte, ocasionando algún tipo de daño, a los humanos u otros equipos electrónicos. Las Leyes de Asimov, conocidas como las Leyes de la Robótica, son una buena guía para la implementación de un "control avanzado". Estas leyes se citan a continuación:

1. Un robot no debe dañar a un ser humano o, por su inacción, dejar que un ser humano sufra algún daño.

2. Un robot debe obedecer las órdenes que le sean dadas por un ser humano, excepto si estas órdenes entran en conflicto con la primera ley.

3. Un robot debe proteger su propia existencia, hasta donde esta protección no entre en conflicto con la primera o segunda ley.

En consecuencia, se debe asegurar que los robots puedan moverse adecuadamente en el ambiente donde deben operar así como lograr evitar obstáculos, siempre garantizando el equilibrio y la estabilidad del sistema. Este tipo de control se define como arquitectura de control para un robot. Para lograr dicho equilibrio y estabilidad un robot requiere disponer de dispositivos que reciban, procesen y transmitan información acerca de su estado.

2.3 MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

El motor de corriente continua es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, principalmente mediante el movimiento

rotatorio. Esta máquina de corriente continua es una de las más versátiles en la industria. Su fácil control de posición, paro y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos.

La principal característica del motor de corriente continua es la posibilidad de regular la velocidad desde vacío a plena carga. Una máquina de corriente continua (generador o motor) se compone principalmente de dos partes, un estator que da soporte mecánico al aparato y tiene un hueco en el centro generalmente de forma cilíndrica. En el estator además se encuentran los polos, que pueden ser de imanes permanentes o devanados con hilo de cobre sobre núcleo de hierro. El rotor es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, al que llega la corriente mediante dos escobillas.

El motor de corriente continua está compuesto de 2 piezas fundamentales que se ilustran en la figura: ROTOR y ESTATOR.

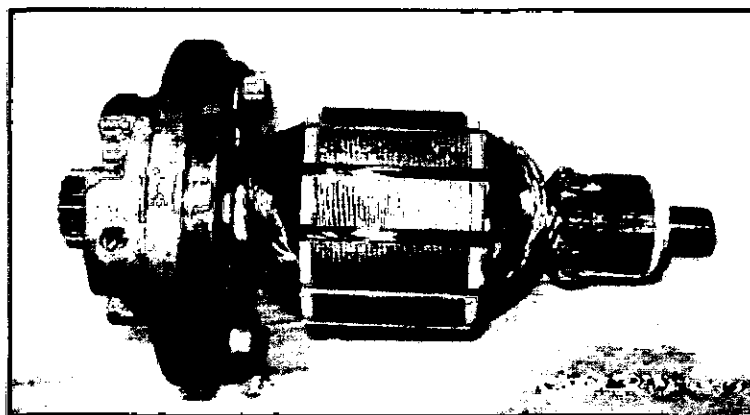


FIG. 1 ROTOR DEL MOTOR

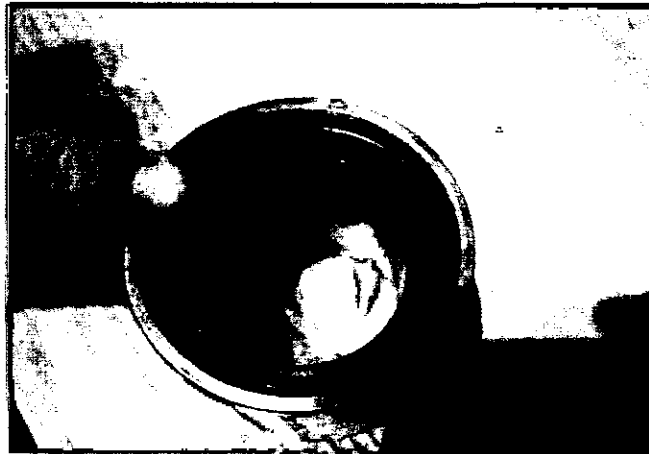


FIG. 2 ESTATOR DEL MOTOR

Dentro de éstas se ubican los demás componentes como:

- Escobillas y porta escobillas
- Colector
- Eje
- Núcleo y devanado del rotor
- Imán Permanente
- Armazón
- Tapas o campanas

2.3.1 ROTOR

Constituye la parte móvil del motor, proporciona el torque para mover a la carga (ver figura). Está formado por:

- Eje: Formado por una barra de acero fresada. Imparte la rotación al núcleo, devanado y al colector.

- **Núcleo:** Se localiza sobre el eje. Fabricado con capas laminadas de acero, su función es proporcionar un trayecto magnético entre los polos para que el flujo magnético del devanado circule.

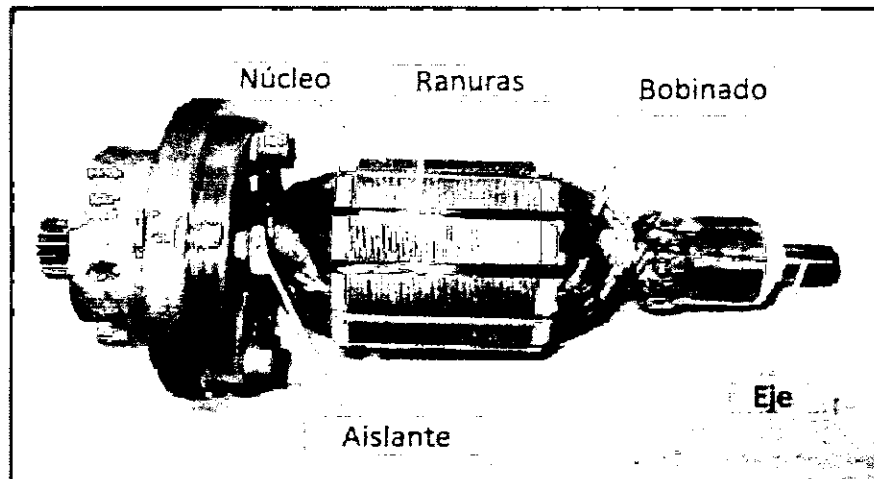


FIG. 3 PARTES DEL ROTOR

Las laminaciones tienen por objeto reducir las corrientes parásitas en el núcleo.

El acero del núcleo debe ser capaz de mantener bajas las pérdidas por histéresis. Este núcleo laminado contiene ranuras a lo largo de su superficie para albergar al devanado de la armadura (bobinado).

- **Devanado:** Consta de bobinas aisladas entre sí y entre el núcleo de la armadura. Estas bobinas están alojadas en las ranuras, y están conectadas eléctricamente con el colector, el cual debido a su movimiento rotatorio, proporciona un camino de conducción conmutado.

- **Colector:** Denominado también conmutador, está constituido de láminas de material conductor (delgas), separadas entre sí y del centro del eje por un material aislante, para evitar cortocircuito con dichos elementos. El colector se encuentra sobre uno de los extremos del eje del rotor, de modo

que gira con éste y está en contacto con las escobillas. La función del colector es recoger la tensión producida por el devanado inducido, transmitiéndola al circuito por medio de las escobillas (llamadas también cepillos).

2.3.2 ESTATOR

Constituye la parte fija de la máquina. Su función es suministrar el flujo magnético que será usado por el bobinado del rotor para realizar su movimiento giratorio, la figura ilustra el estator de un motor DC.

Está formado por:

- Armazón: Denominado también yugo, tiene dos funciones primordiales: servir como soporte y proporcionar una trayectoria de retorno al flujo magnético del rotor y del imán permanente, para completar el circuito magnético (Ver figura).



FIG. 4 PARTES DEL ESTATOR

Imán permanente: Compuesto de material ferro magnético altamente remanente, se encuentra fijado al armazón o carcasa del estator. Su

función es proporcionar un campo magnético uniforme al devanado del rotor o armadura, de modo que interactúe con el campo formado por el bobinado, y se origine el movimiento del rotor como resultado de la interacción de estos campos.

Escobillas: Las escobillas están fabricadas de carbón, y poseen una dureza menor que la del colector, para evitar que éste se desgaste rápidamente. Se encuentran albergadas por la porta escobillas. Ambos, escobillas y porta escobillas, se encuentran en una de las tapas del estator.

La función de las escobillas es transmitir la tensión y corriente de la fuente de alimentación hacia el colector y, por consiguiente, al bobinado del rotor. La función de la porta escobillas es mantener a las escobillas en su posición de contacto firme con los segmentos del colector. Esta función la realiza por medio de resortes, los cuales hacen una presión moderada sobre las escobillas contra el colector. Esta presión debe mantenerse en un nivel intermedio pues, de ser excesiva, la fricción desgastaría tanto a las escobillas como al colector; por otro lado, de ser mínima esta presión, se produciría lo que se denomina "chisporroteo", que es cuando aparecen chispas entre las superficies del colector y las escobillas, debido a que no existe un buen contacto.

2.4 MICROCONTROLADOR

Un Microcontrolador es un Circuito integrado o chip que incluye en su interior las tres unidades funcionales de un ordenador: CPU, Memoria y

Unidades de E/S, es decir, se trata de un computador completo en un solo circuito integrado.

Aunque sus prestaciones son limitadas, además de dicha integración, su característica principal es su alto nivel de especialización. Aunque los hay del tamaño de una moneda, lo normal es que sean incluso más pequeños, ya que, lógicamente, forman parte del dispositivo que controlan.

Un Microcontrolador típico posee en su interior un generador de reloj integrado, una pequeña cantidad de memoria RAM y ROM/EPROM/EEPROM. Para hacerlos funcionar todo lo que se necesita son unos pocos programas de control, alimentación (típicamente 3.3V o 5V) y un cristal de sincronización.

De la Figura observamos, que sin importar el fabricante del microcontrolador, siempre encontraremos que cuenta con:

- Procesador o CPU (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/EPROM/EEPROM/Flash.
- Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.
- Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, puertos serie y paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital/Analógico, etc.).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

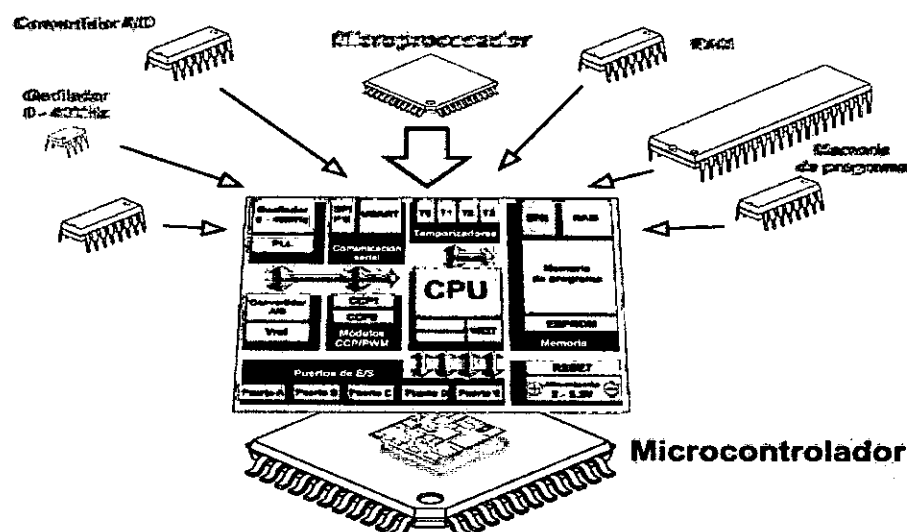


FIG. 5 COMPONENTES BÁSICOS PRESENTES EN UN MICROCONTROLADOR

2.5 ARDUINO¹

Arduino es una plataforma de hardware libre basada en una sencilla placa de entradas y salidas simple y un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring. Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software del ordenador (por ejemplo: Macromedia Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data). Las placas se pueden montar a mano o adquirirse. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente.



FIG. 6 ARDUINO LOGO

¹ www.arduino.cc

Las plataformas Arduino están basadas en los microcontroladores Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 y otros similares, chips sencillos y de bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños.

Al ser open-hardware, tanto su diseño como su distribución son libres. Es decir, puede utilizarse libremente para el desarrollo de cualquier tipo de proyecto sin haber adquirido alguna licencia. Además en la página www.arduino.cc se puede encontrar una gran cantidad de tutoriales, proyectos pasos a paso y el respaldo de toda una comunidad a través de foros.

Constituye una herramienta útil en aplicaciones de:

- Sensado, gracias a sus entradas digitales y analógicas.
- Comunicación, pudiendo incluir I2C, TWI ("Two Wire Interface"), SPI o UART.
- Control de dispositivos, mediante las salidas digitales o de PWM ("Pulse Width Modulation")

Otras ventajas que proporciona son:

- Código abierto: permite que el software sea desarrollado y distribuido libremente.
- Bajo costo: ya que nació con esta idea como fundamento, hace que la electrónica sea asequible a un mayor número de personas, lo que favorece su expansión.
- Conjugado con el punto anterior, se obtiene una amplia comunidad que participa en el desarrollo de nuevos programas y de nuevo hardware compatible, esto favorece un feedback o realimentación continua, ya que

cada vez la cantidad de información y de dispositivos es mayor, adaptándose mejor a las necesidades de potenciales nuevos usuarios, y cada uno de ellos aportando nuevamente información o desarrollo de dispositivos. Esto es fácilmente visible navegando por internet, donde se encuentran gran número de páginas y blogs relacionadas con Arduino.

- Alta compatibilidad: puede adaptarse para ser usado en proyectos electrónicos de casi cualquier tipo, ya sea a través de hardware desarrollado específicamente para Arduino, como utilizando hardware más general.

- Página Web propia, <http://arduino.cc/>, disponible en varios idiomas. Contiene gran cantidad de información que facilita una inmersión rápida.



FIG. 7 PÁGINA WEB ARDUINO

- Homepage: con información acerca del producto y la empresa.
- Buy: incluye los canales para adquirir sus productos, con enlaces a tiendas o distribuidores.
- Download: sección desde la que descargar el software necesario para la puesta en marcha.

- Products: dispositivos como placas, shields o kits desarrollados por ellos, hojas de documentación, descripción del producto, etc.
- Learning: guía con los primeros pasos, numerosos ejemplos y el Playground, una sección en la que compartir información y programas.
- Reference: contiene todo lo relacionado acerca del lenguaje como funciones, estructuras de control, tipos de datos o creación de librerías.
- Support: sección con las preguntas más frecuentes y el foro.

Las dos de las placas ARDUINO más utilizadas, son el Arduino Uno y el Arduino MEGA.

El Arduino MEGA utiliza un potente procesador de AVR ATMEGA1280 o AVR ATMEGA 2560 con un amplio espacio de memoria para programar y corre a 16Mhz. Es ideal para proyecto de robótica ya que lo mejor es su elevada cantidad de pines de entrada y salida 54, (14 con PWM) y sus 4 puertos UART por hardware.

Características técnicas:

- Microcontrolador: ATmega1280, 2560.
- Tensión de alimentación: 5V.
- Tensión de entrada recomendada: 7-12V.
- Límite de entrada: 6-20V.
- Pines digitales: 54 (14 con PWM).
- Entradas analógicas: 16.
- Corriente máxima por pin: 40 mA.

- Corriente máxima para el pin 3.3V: 50 mA.
- Memoria flash: 128 KB (4 KB usado por el bootloader).
- SRAM: 8 KB.
- EEPROM: 4 KB.
- Velocidad de reloj: 16 MHz.

2.6 PUENTE H

Un puente H adopta la letra H, por ello su nombre debido a la forma que presenta dentro de un circuito esquemático simplificado, como el que se ve en la Figura. En la barra central se encuentra ubicado el motor y en cada "rama lateral" ascendente o descendente se ubican los conmutadores que, activados de manera apropiada, brindarán al sistema los movimientos necesarios para que el motor utilizado pueda girar en un sentido u otro. La letra H queda formada por la ubicación de los conmutadores en el circuito.

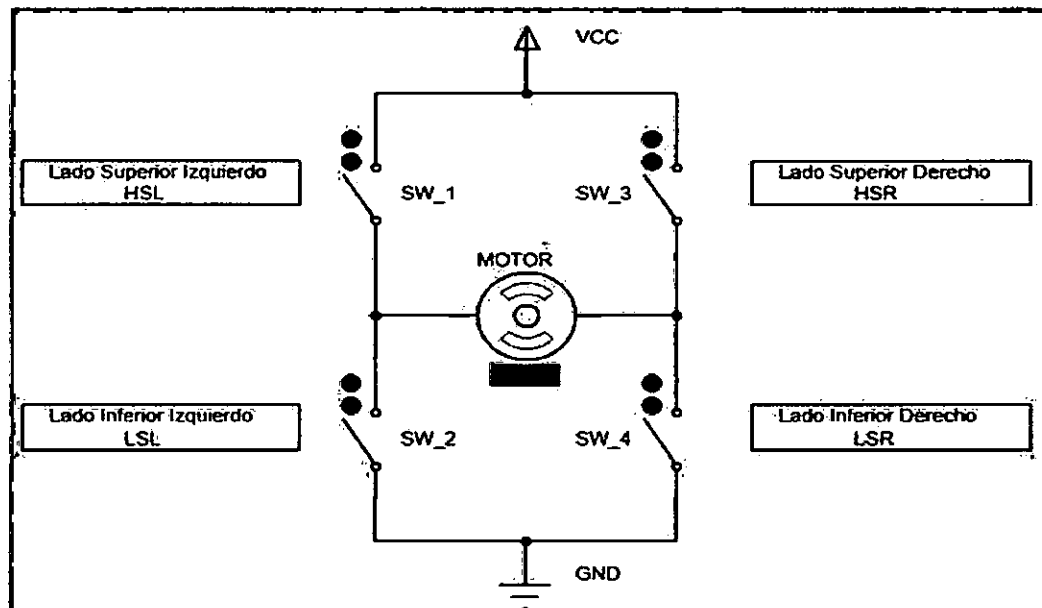


FIG. 8 UBICACIÓN DE LOS CONMUTADORES O TRANSISTORES, FORMADO UNA H

De acuerdo al apropiado manejo de los conmutadores, obtendremos todos los movimientos sobre el motor. Para conectar el motor y hacerlo girar se deben activar los conmutadores por pares opuestos en lo que respecta a lados y a posición (superior o inferior). Un error en la activación que permita la conexión de elementos superiores e inferiores de un mismo lado provocará una descarga muy rápida y abrupta de la batería que se esté utilizando o, en el peor de los escenarios, destruirá los elementos conmutadores. Como se ve en la Figura, para un giro seguro en uno de los dos sentidos, se debe cerrar SW1 y SW4, observando que SW2 y SW3 permanezcan abiertas (líneas rojas). En el caso inverso sería SW2 y SW3 cerradas, mientras que SW1 y SW4 deberán permanecer abiertas (líneas azules).

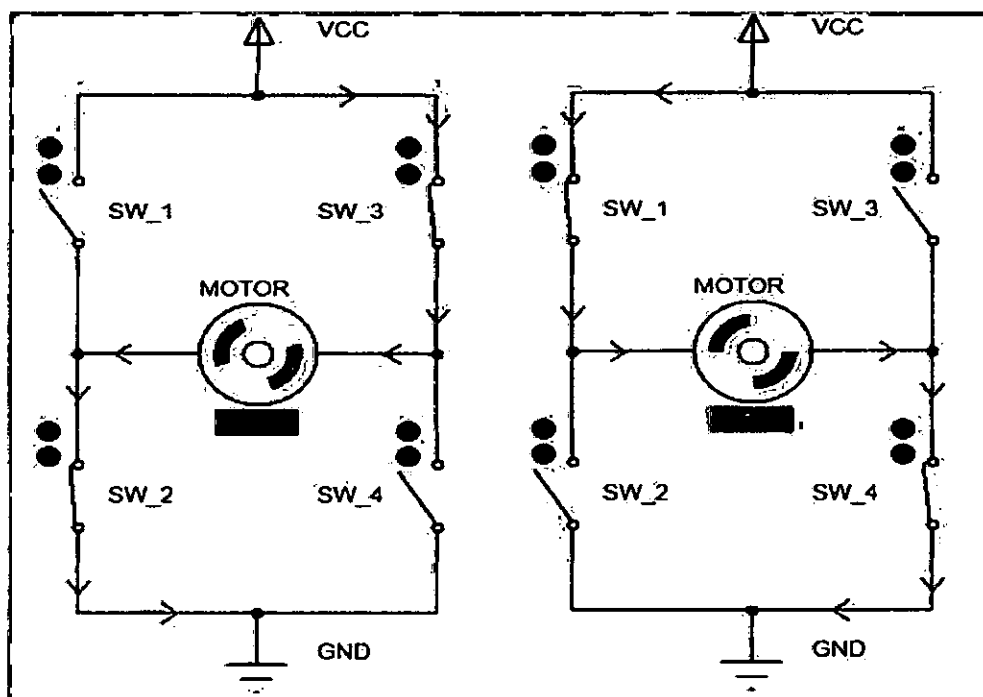


FIG. 9 FLUJO DE LA CORRIENTE A TRAVÉS DE LOS CONMUTADORES O TRANSISTORES Y EL MOTOR

En la actualidad, para operar motores de CC permitiendo un funcionamiento de giro en ambos sentidos se utilizan, en la mayoría de los casos, circuitos con transistores MOSFET en lugar de los conmutadores genéricos SW1 a SW4 mencionadas con anterioridad. Algunos diseñadores prefieren utilizar transistores de canal P para los lados superiores y de canal N para los inferiores. La ventaja de este concepto de diseño es que las tensiones necesarias para activar los Gates de los transistores de canal P se podrán sacar directamente de la alimentación utilizada para el motor. Si por el contrario se utilizan transistores de Canal N en el lado superior de la H, la tensión necesaria para activar los Gates deberá provenir de un elevador de tensión que funcione por encima del valor nominal de alimentación del motor. Observando la figura se comprende mejor este concepto:

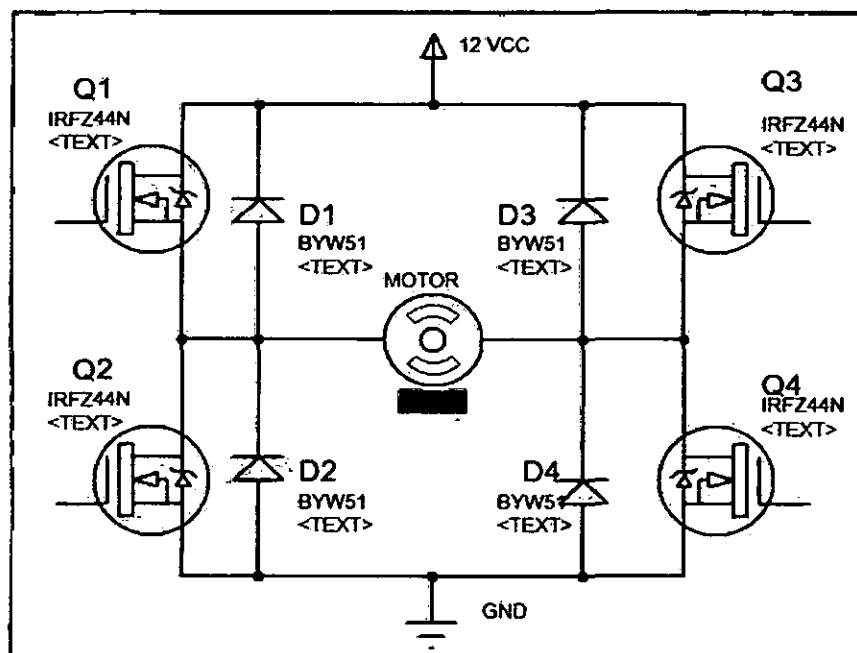


FIG. 10 LOS INTERRUPTORES REEMPLAZADOS POR TRANSISTORES MOSFET DENTRO DEL PUENTE H Y LA CIRCULACIÓN DE CORRIENTE PARA LOGRAR LOS DOS SENTIDOS DE GIRO.

Para obtener un sentido de giro determinado, los transistores MOSFET IRFZ44N mostrados en Figura deberán comportarse como verdaderas llaves conmutadoras. Tal como se desprende de la hoja de datos del transistor empleado, para que este tipo de transistor MOSFET de canal N conduzca a pleno, ofreciendo la menor resistencia entre Drain y Source, la tensión de Gate respecto a Source deberá ser más positiva y el orden de los 2 a 4 Volts. Si se asume que el transistor Q1 (en un sentido de giro) y Q3 (en el otro sentido de giro) ofrecen la mínima resistencia, el potencial de 12 Volts que alimenta los Drains respectivos pasará (según el giro seleccionado) hacia el motor, tal como muestra la figura.

Para que en el Source existan los 12 Volts, en el Gate se debe aplicar una tensión entre los 14 y los 16 Volts, es decir, 2 a 4 Volts por sobre el Source. De lo contrario, la tensión necesaria para activar el transistor a la máxima conducción se descontará de la tensión de alimentación y al motor le llegarán 10 Volts o menos. De este modo, se tendrá una máxima circulación de corriente a través de Drain – Source para hacer girar el motor al máximo, con una diferencia de potencial de 2 Volts o más entre estos dos terminales del transistor.

Esto equivale, según la fórmula de potencia, que 2 Volts multiplicados por la máxima corriente del motor será una potencia que disipará en forma de calor en el transistor. Cuanto mayor sea la corriente para hacer funcionar el motor, mayor será el calor generado por los transistores, por lo tanto, mayor será el tamaño de los disipadores.

Muchos diseñadores prefieren evitar estos inconvenientes utilizando transistores de canal P en las ramas superiores del puente H, pero ocurre que estos dispositivos son más caros y difíciles de conseguir que los de canal N.

2.7 PWM

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM, siglas en inglés de pulse-width modulation) de una señal o fuente de energía, es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

Los parámetros fundamentales del PWM son el periodo (T) y el ciclo de trabajo o duty cycle (D). El ciclo de trabajo indica el tiempo que la función vale uno respecto al tiempo total (el periodo). La figura muestra tres ciclos de trabajo distintos. Observa que el periodo del PWM se mantiene constante, y lo que cambia es el tiempo en que la señal se mantiene a uno respecto al periodo total.

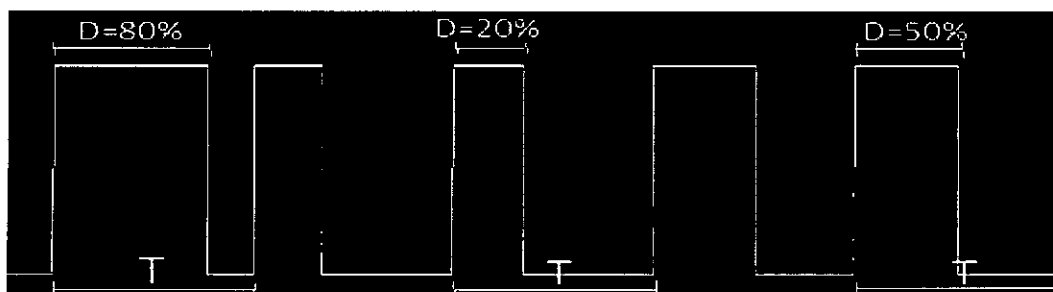


FIG. 11 SEÑAL DE PWM A LA QUE SE LE HA CAMBIADO EL CICLO DE TRABAJO.

Si el periodo del PWM es suficientemente pequeño, el dispositivo que está gobernado (por ejemplo, el motor) no notará las variaciones de la tensión y el resultado es que el motor recibirá una corriente promedio dada por el ciclo de trabajo.

En la figura se muestran dos señales PWM, la primera equivale a una tensión continua del 50% de la nominal: El motor irá a un 50% de la velocidad máxima. Y la segunda equivale a una tensión continua del 20% de la nominal: el motor irá a un 20% de la velocidad máxima.

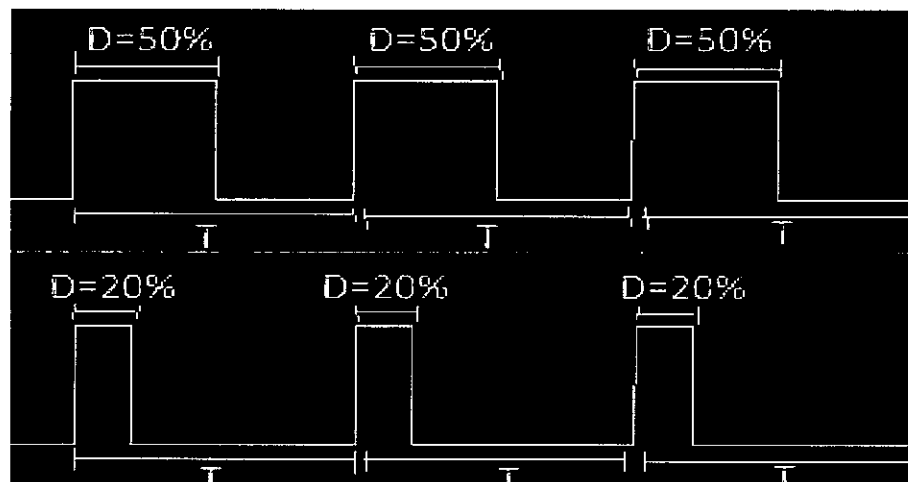


FIG. 12 CONTROL DE VELOCIDAD CON EL PWM.

2.8 BATERÍAS

Batería, batería eléctrica, acumulador eléctrico o simplemente acumulador, se le denomina al dispositivo que almacena energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces. Se trata de un generador eléctrico secundario; es decir, un

generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga.

El término pila, en castellano, denomina los generadores de electricidad basados en procesos químicos normalmente no reversibles, o acumuladores de energía eléctrica no recargables; mientras que batería se aplica generalmente a los dispositivos electroquímicos semi-reversibles, o acumuladores de energía eléctrica que sí se pueden recargar. Tanto pila como batería son términos provenientes de los primeros tiempos de la electricidad, en los que se juntaban varios elementos o celdas: en el primer caso uno encima de otro, "apilados", y en el segundo, adosados lateralmente, "en batería", como se sigue haciendo actualmente, para así aumentar la magnitud de los fenómenos eléctricos y poder estudiarlos sistemáticamente.

De esta explicación se desprende que cualquiera de los dos nombres serviría para cualquier tipo, pero la costumbre ha fijado la distinción.

El término acumulador se aplica indistintamente a uno u otro tipo, así como a los capacitores eléctricos o a futuros métodos de acumulación, erigiéndose de este modo como el término neutro capaz de englobar y describir a todos ellos.

2.8.1 TIPOS DE BATERIA

Según su naturaleza interna, en el comercio se encuentran generalmente baterías de los siguientes tipos:

2.8.1.1 Acumulador de plomo (Pb)

Está constituido por dos electrodos de plomo, de manera que, cuando el aparato está descargado, se encuentra en forma de sulfato de plomo (II) (PbSO_4) incrustado en una matriz de plomo metálico (Pb); el electrólito es una disolución de ácido sulfúrico. Este tipo de acumulador se sigue usando aún en muchas aplicaciones, entre ellas en los automóviles.

Ventajas:

- Bajo coste
- Fácil fabricación

Desventajas:

No admiten sobrecargas ni descargas profundas, viendo seriamente disminuida su vida útil.

Altamente contaminantes.

Baja densidad de energía: 30 Wh/Kg

Peso excesivo, al estar compuesta principalmente de plomo, paradójicamente es más liviana una carga de ladrillos que un acumulador de plomo de 24 volts, por esta razón su uso en automóviles eléctricos es considerado como un absurdo por los técnicos electrónicos con experiencia. Su uso se restringe por esta razón en aplicaciones estacionarias como por ejemplo fuentes de alimentación ininterrumpidas para equipos médicos.

Voltaje proporcionado: 12V Densidad de energía: 30 Wh/K

2.8.1.2 Batería alcalina

También denominada de ferroníquel, sus electrodos son láminas de acero en forma de rejilla con panales rellenos de óxido níqueloso (NiO), que

constituyen el electrodo positivo, y de óxido ferroso (FeO), el negativo, estando formado el electrolito por una disolución de potasa cáustica (KOH). Durante la carga se produce un proceso de oxidación anódica y otro de reducción catódica, transformándose el óxido níqueloso en níquelico y el óxido ferroso en hierro metálico. Esta reacción se produce en sentido inverso durante la descarga.

Se utilizan para aparatos complejos y de elevado consumo energético. En sus versiones de 1,5 voltios, 6 voltios y 12 voltios se emplean, por ejemplo, en mandos a distancia (control remoto) y alarmas.

2.8.1.3 Baterías alcalinas de manganeso

Con un contenido de mercurio que ronda el 0,1% de su peso total, es una versión mejorada de la pila anterior, en la que se ha sustituido el conductor iónico cloruro de amonio por hidróxido de potasio (de ahí su nombre de alcalina). El recipiente de la pila es de acero, y la disposición del zinc y del óxido de manganeso (IV) (o dióxido de manganeso) es la contraria, situándose el zinc, ahora en polvo, en el centro. La cantidad de mercurio empleada para regularizar la descarga es mayor. Esto le confiere mayor duración, más constancia en el tiempo y mejor rendimiento. Por el contrario, su precio es más elevado. También suministra una fuerza electromotriz de 1,5 V. Se utiliza en aparatos de mayor consumo como: grabadoras portátiles, juguetes con motor, flashes electrónicos.

Este tipo de baterías presenta algunas desventajas:

Una pila alcalina puede contaminar 175.000 litros de agua, que llega a ser el consumo promedio de agua de toda la vida de seis personas.

Una pila común, también llamada de zinc-carbono, puede contaminar 3.000 litros de agua. Zinc, manganeso (Mn), bismuto (Bi), cobre (Cu) y plata (Ag): Son sustancias tóxicas, que producen diversas alteraciones en la salud humana. El zinc, manganeso y cobre son esenciales para la vida, en cantidades mínimas, y tóxicos en altas dosis. El bismuto y la plata no son esenciales para la vida.

2.8.1.4 Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd)

Utilizan un cátodo de hidróxido de níquel y un ánodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de hidróxido de potasio. Esta configuración de materiales permite recargar la batería una vez está agotada, para su reutilización. Sin embargo, su densidad de energía es de tan sólo 50 Wh/kg, lo que hace que tengan poca capacidad. Admiten sobrecargas, se pueden seguir cargando cuando ya no admiten más carga, aunque no la almacena. Admiten un gran rango de temperaturas de funcionamiento.

Voltaje proporcionado: 1,2V

Densidad de energía: 50 Wh/Kg

Capacidad usual: 0.5 a 1.0 Amperios (en pilas tipo AA)

Efecto memoria: muy Alto

2.8.1.5 Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH)

Utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico. Este tipo de baterías se encuentran menos afectadas por el llamado efecto memoria. No admiten bien el frío extremo, reduciendo drásticamente la potencia eficaz que puede entregar. Voltaje

proporcionado: 1,2V Densidad de energía: 80 Wh/Kg Capacidad usual: 0.5 a 2.8 Amperios (en pilas tipo AA)

Efecto memoria: bajo

Baterías de iones de litio (Li-ion)

Las baterías de iones de litio (Li-ion) utilizan un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de cobalto, trifilina (LiFePO_4) u óxido de manganeso. Su desarrollo es más reciente, y permite llegar a altas densidades de capacidad. No admiten descargas, y sufren mucho cuando éstas suceden por lo que suelen llevar acoplada circuitería adicional para conocer el estado de la batería, y evitar así tanto la carga excesiva, como la descarga completa. Apenas sufren el efecto memoria y pueden cargarse sin necesidad de estar descargadas completamente, sin reducción de su vida útil. No admiten bien los cambios de temperatura.

Voltaje proporcionado:

- A Plena carga: Entre 4.2V y 4.3V dependiendo del fabricante
- A carga nominal: Entre 3.6V y 3.7V dependiendo del fabricante
- A baja carga: Entre 2,65V y 2,75V dependiendo del fabricante (este valor no es un límite, se recomienda).

Densidad de energía: 115 Wh/Kg

Capacidad usual: 1.5 a 2.8 Amperios (en pilas tipo AA)

Efecto memoria: muy bajo

2.8.1.6 Baterías de polímero de litio (LiPo)

Son una variación de las baterías de iones de litio (Li-ion). Sus características son muy similares, pero permiten una mayor densidad de

energía, así como una tasa de descarga bastante superior. Estas baterías tienen un tamaño más reducido respecto a las de otros componentes. Su tamaño y peso las hace muy útiles para equipos pequeños que requieran potencia y duración, como manos libres bluetooth.

2.8.1.7 Pilas de combustible

La pila de combustible no se trata de un acumulador propiamente dicho, aunque sí convierte energía química en energía eléctrica y es recargable.

Funciona con hidrógeno. (Otros combustibles como el metano o el metanol son usados para obtener el hidrógeno).

2.9 SENSORES

Son los que permiten hacer la retroalimentación. Es uno de los elementos fundamentales de cualquier sistema de control de lazo cerrado. En el sistema de control referente al presente trabajo, los sensores permiten estimar las distintas variables físicas (inclinación del vehículo) y enviárselas al micro controlador para ejecutar alguna acción de control que ha sido programada previamente y así realizar el control de la planta dinámica.

Para el control de la planta dinámica del sistema, se requiere medir ángulo de inclinación del vehículo, se presentan una serie de factores relativos a la naturaleza de los sensores asociados a dicha medición.

2.9.1 ESTIMACION DEL ANGULO

Esta medición presenta gran complejidad, en ciertas aplicaciones en donde se necesita medir inclinación de manera inercial, para ello se utiliza un IMU o unidad de medición inercial. Se utilizan en sistemas de navegación inercial para la medición de variables cinemáticas como la posición, velocidad y aceleración, ya sea lineal o angular, además de la orientación de cualquier objeto en los tres ejes coordenados sin ninguna referencia, son de gran utilidad en las aeronaves, barcos y misiles perseguidores entre otras aplicaciones, en la figura se muestran los ángulos de inclinación que un IMU puede medir necesarios para la aeronavegación.

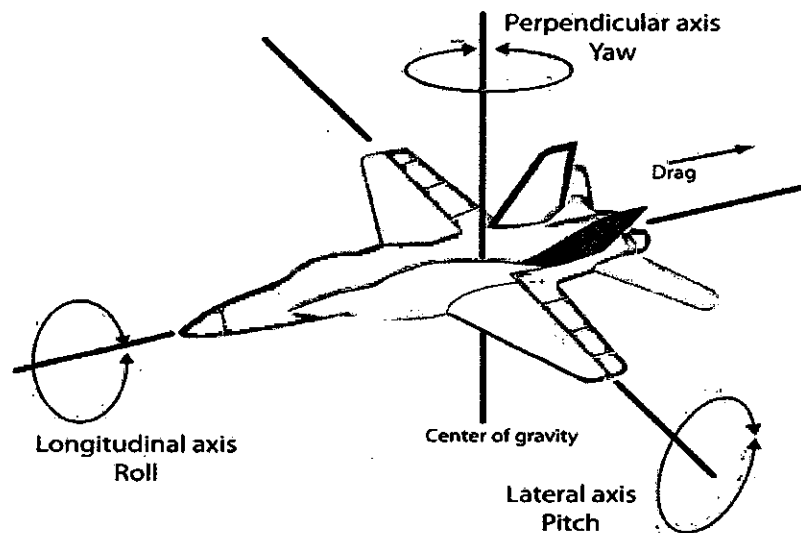


FIG. 13 ÁNGULOS DE INCLINACIÓN QUE PERMITE LEER UN IMU.

Un IMU integra, acelerómetros triaxiales, giroscopios triaxiales y compas electrónico, además una computadora que pueda integrar digitalmente las señales de los diferentes sensores de manera que pueda

calcularse las variables cinemáticas necesarias (posición, velocidad, aceleración, tanto lineal como angular), la calibración de estos sensores requiere de un complejo cálculo matemático para las múltiples integraciones numéricas y la implementación de filtros digitales para el respectivo tratamiento de la señal.

2.9.2 ACELEROMETRO COMO SENSOR DE INCLINACIÓN

Un acelerómetro triaxial, es un sensor que detecta aceleraciones externas en los tres ejes coordenados, referenciando el valor respecto de la gravedad.

Los acelerómetros analógicos entregan un voltaje proporcional a la aceleración externa que se someta, este voltaje permite cuantificar la aceleración en m/s^2 .

Cuando se requiere utilizar un acelerómetro para medir inclinación se toma como referencia la aceleración de la gravedad, sabiendo que la dirección de esta aceleración apunta al centro de la tierra o en dirección vertical, la magnitud de la aceleración en dirección vertical es $-1g$, si se inclina el sensor se puede apreciar que la aceleración en el eje vertical disminuye hasta cero cuando el eje vertical se encuentra perpendicular a la dirección de la gravedad, este cambio permite cuantificar un valor de inclinación utilizando las siguientes fórmulas que se basan en la figura.

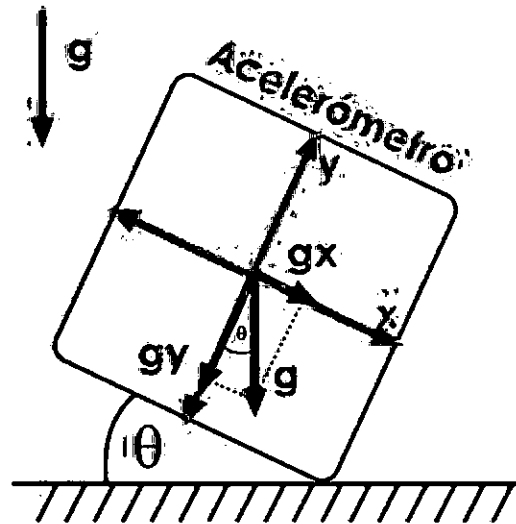


FIG. 14 DESCOMPOSICIÓN DE LA GRAVEDAD EN LOS EJES X, Y.

Al descomponer la gravedad en los ejes X, Y se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$g_y = g * \cos(\theta)$$

$$g_x = g * \sin(\theta)$$

Es importante notar que dependiendo del cuadrante en que se encuentre el ángulo se debe usar una u otra ecuación, ya que solo una permitirá establecer el signo del ángulo.

Por lo tanto el acelerómetro dará las componentes de la aceleración (g_x , g_y). El cálculo del valor de inclinación se hace de la siguiente manera:

$$\theta = \arccos\left(\frac{g_y}{g}\right)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{g_x}{g}\right)$$

Vale resaltar que este valor de inclinación será tan preciso como lo sea el sensor utilizado, y que la aceleración calculada sea únicamente la de la gravedad, al no ser así, al incluirse aceleraciones externas debido a movimientos bruscos del sensor, este incluirá un error significativo en el valor de inclinación, el sistema es un vehículo en movimiento por lo que estará expuesto a aceleraciones externas distintas a las de la gravedad.

2.10 GIROSCOPIO ELECTRÓNICO COMO SENSOR DE INCLINACIÓN

Un giroscopio es un sensor que permite medir velocidad angular (ω), este sensor cuando es analógico, entrega un voltaje proporcional a la velocidad angular y dependiendo de la resolución del sensor se podrán detectar velocidades angulares muy pequeñas.

Sabemos que la velocidad angular es la derivada de la posición angular, es decir la variable que se busca estimar es:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$d\theta = \omega * dt$$

Integrando respecto dt :

$$d\theta = \omega * dt$$

Se obtiene:

$$\theta = \theta_0 + \omega * dt$$

Esta integración requiere de una condición inicial que pueda ser dada por el acelerómetro, y la integración se hace durante un periodo de tiempo constante dt llamado tiempo de muestreo del sensor. Esta integración numérica se hace con ayuda de un microcontrolador.

Esta opción tiene la gran ventaja respecto del acelerómetro que las aceleraciones externas no le afectan.

El problema más claro de esta solución es el error acumulado asociado a la integración numérica, que provoca que luego de transcurrido cierto tiempo de cómputo la estimación del ángulo tenga errores incluidos, en este tipo de aplicaciones este error es conocido como drift, ya que el valor asociado a la inclinación nula se desplazará algunos grados conforme pasa el tiempo de procesamiento.

Apreciando las ventajas y desventajas que presentan cada uno de los sensores que integran el IMU, se debe hacer el cálculo del Angulo lo más preciso posible para poder tener una correcta estabilización del vehículo, como el acelerómetro presenta una buena estimación del ángulo a largo plazo, de manera estática cuando el vehículo no se mueve bruscamente, mientras el giroscopio presenta buena estimación del ángulo a corto plazo en donde el vehículo presenta cambios de dirección o

aceleraciones significativas, el ángulo se calcula utilizando los dos sensores al unisonó, podría utilizarse la siguiente ecuación.

$$\theta_{real} = \theta_{g_y r_0} * \beta + \theta_{acelerometro} * (1 - \beta)$$

Este valor de $\beta \in [0,1]$ determina el porcentaje de creencia de cada estimación, y el valor se debe calcular de manera empírica observando el comportamiento del vehículo, los IMU son más precisos en cuanto tengan más giroscopios y las resoluciones y rangos de los sensores sean aún más altas, además, cuando se requiere estimar el ángulo en diferentes ejes se debe tener acelerómetros y giroscopios de múltiples grados de libertad, en este caso que se requiere calcular únicamente el ángulo rotación de la plataforma respecto al eje de las ruedas como lo muestra la figura, por lo que será necesario la utilización de un giroscopio de un grado de libertad y un acelerómetro de dos ejes.

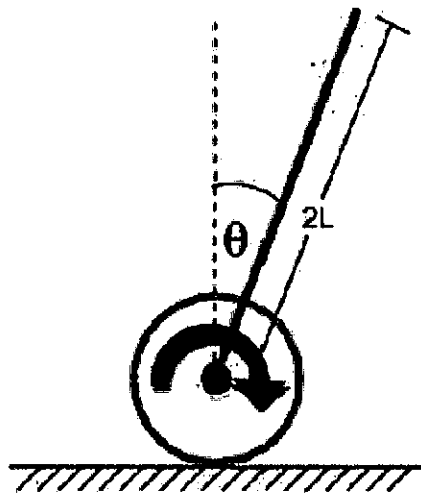


FIG. 15 ROTACIÓN DEL VEHÍCULO RESPECTO LAS RUEDAS.

Selección de sensores: como sabemos la variable principal que debemos estimar es el ángulo, y por tanto es indispensable implementar la IMU (inertial measurement unit), y por tanto la precisión y exactitud de esta estimación es dependiente de los sensores seleccionados, en la selección se evalúan diferentes aspectos respecto a la disponibilidad, costo, resolución, voltaje de alimentación, etc. Se muestran las opciones que se evaluaron para el acelerómetro y giroscopio.

2.10.1 Características de selección de los sensores

2.10.1.1 Voltaje de alimentación del sensor (V_{dd})

Es el voltaje que continuamente debe alimentar el sensor, por tanto la salida en voltios del sensor variara entre 0 y el V_{dd} , la importancia de esta característica radica que estos sensores son sensibles a sobre voltajes y a posibles daños, la estabilidad de la lectura del sensor depende de la estabilidad de la alimentación de este, por tanto se hace necesario disponer de una fuente de alimentación precisa y estable para los sensores, o tener alguna fuente de alimentación mayor y regularla utilizando integrados reguladores de voltaje, es beneficioso tener sensores que requieran el mismo voltaje para poder construir un módulo de sensores con su respectiva fuente y separarlos de la fuente de alimentación de potencia que involucra ruido.

2.10.1.2 Consumo de corriente (I_{dd})

La corriente de consumo permite cuantificar cuanta potencia requiere el sensor en el modo activo, esta potencia es significativa para los módulos o aplicaciones en donde no se dispone de la red eléctrica y es

necesario la utilización de baterías aunque el consumo es relativamente bajo es necesario hacer un control de este consumo en operación para un sensible ahorro de potencia del sistema, aumentando la vida útil de las baterías lo cual se refleja en autonomía variable significativa en cualquier sistema de transporte y que aplica en nuestro sistema. Los sensores disponen de modo sleep, que permiten bajo consumo del sensor cuando la utilización del sensor es nula, es mediante el microcontrolador que se programa estos modos de utilización.

2.10.1.3 Bajo consumo

Consumo de corriente en modo sleep, es relacionado con el consumo de potencia, entre menor sea este consumo es más eficiente el sistema de control en cuanto al consumo energético.

2.10.1.4 Rango

Rango de medida del acelerómetro, es el valor máximo de aceleración que puede medir el sensor, se calcula teniendo como referencia la aceleración de gravedad, por esto la unidad que se utiliza es g, algunos sensores suministran múltiples rangos, el rango nos permite evaluar la aplicación del sensor, ya que existen sistemas en los que se requiere medir aceleración muy bajas, o muy altas, entre menor el rango de medición, mayor es la sensibilidad del sensor, de la cual se habla en los siguientes ítems.

2.10.1.5 Sensibilidad

Permite obtener la relación entre los voltios entregados por el sensor y la variable física censada, en este caso particular de medición de aceleración tenemos la sensibilidad dada en milivoltios por gravedad, la importancia radica en la integración del sensor y el ADC (convertidor análogo digital)

combatir estos problemas, los chips se encuentran protegidos por una carcasa o encapsulado.

La razón de que el encapsulado sea una característica de selección de los sensores, es debido a que debemos realizar un módulo de sensores donde se deben conectar, debido a la carencia equipos para soldar circuitos integrados superficiales de requiere de sensores montados sobre PCB, algunos fabricantes venden el sensor y también el sensor en el PCB, la facilidad de montar el sensor el módulo de sensores no inclina a seleccionar sensores que tengan montaje en PCB.

2.10.1.9 Interfaz

Existen dos tipos de señales digitales y análogas, de la misma forma los sensores suministran una señal análoga o digital, las señales análogas son procesadas por un ADC (convertidor análogo digital) que codifica la señal en bits para que pueda ser manejada por una computadora y realizar alguna acción de control, al contrario algunos sensores entregan la información de manera digital, por medio de algún protocolo de comunicación para permitir intercambio de información entre circuitos integrados, o entre el sensor y la computadora que no necesita de un ADC para poder manejar los datos, los protocolos de comunicación que pueden utilizarse definen la interfaz del sensor, los sensores digitales son muy apreciados cuando estos se encuentran en una ambiente de ruido electromagnético ya que no se dejan afectar, lo contrario pasa con los sensores análogos sensibles al ruido, incluyendo errores en la lectura de la variable.

2.10.2 IMU

La Unidad de Medición Inercial o IMU es un dispositivo electrónico que mide y registra información obtenida acerca de la velocidad, la orientación y los efectos de las fuerzas gravitatorias. Utiliza una combinación de acelerómetro y giróscopos para obtener sistemas de 6 grados de libertad, que pueden ser ampliados hasta los 9 incluyendo magnetómetros.

Para los requerimientos de nuestro robot será suficiente con emplear el sistema de 6 grados de libertad que incluye 3 acelerómetros dispuestos de forma ortogonal y 3 giróscopos dispuestos también de forma ortogonal. La implementación de los sensores en este formato IMU difiere de su forma habitual y se trata a continuación.

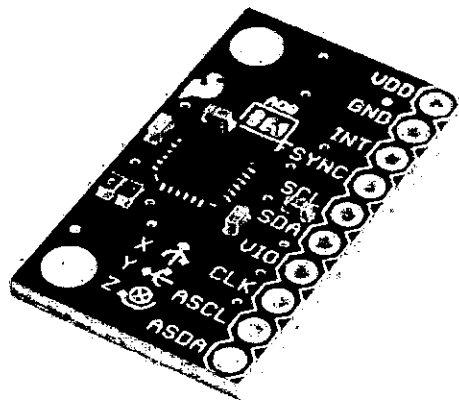


FIG. 16 IMU MPU6050 SPARKFUN

2.10.3 Acelerómetro

Los acelerómetros MEMS ("Microelectromechanical Systems") son de tamaño reducido y pueden estar incluidos en las IMU anteriormente descritas. La principal ventaja de estos dispositivos MEMS es que pueden ser creados mediante técnicas de fabricación microelectrónica en un chip

de silicio, a la vez que toda la electrónica necesaria para el sistema de acondicionamiento, adquisición y comunicación a un precio y un tamaño muy reducidos.

La estructura de estos dispositivos puede apreciarse en la imagen, contienen por lo general placas capacitivas internas, algunas fijas y otras móviles. Las fuerzas de aceleración que actúan sobre el sensor variarán la disposición de unas con respecto a las otras modificando la capacitancia existente entre ambas. Estos cambios serán traducidos posteriormente en señales que podremos utilizar.

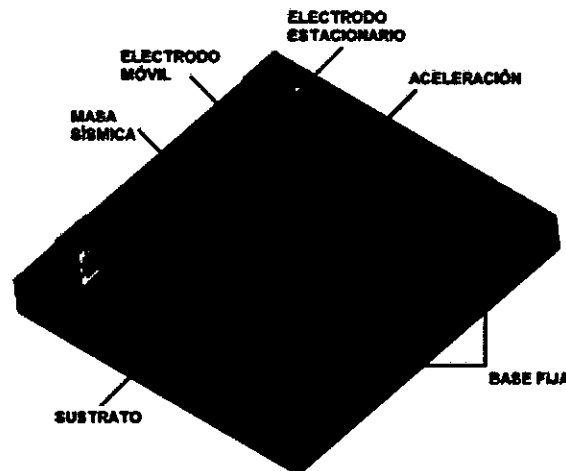


FIG. 17 ACELERÓMETRO MEMS

2.10.4 Giróscopo

Los sensores giroscópicos incluidos en el IMU son también MEMS, su funcionamiento está basado en una pequeña masa que varía su posición al variar la velocidad angular, el dispositivo convierte estos cambios en una señal medible. Gracias a este diseño, ha sido posible reducir de forma notable el tamaño de estos dispositivos y poder así incluirlos en un circuito integrado.

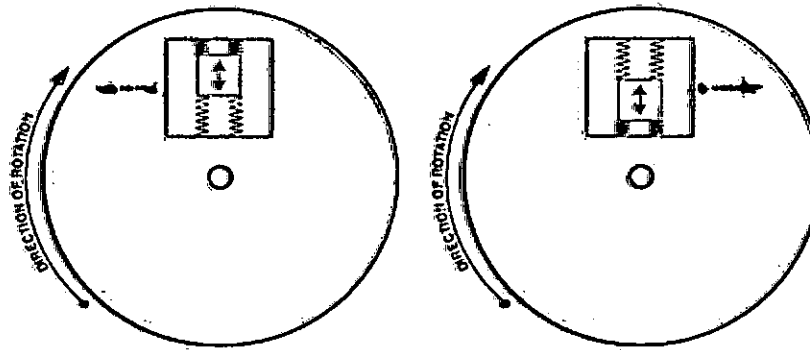


FIG. 18 GIRÓSCOPO MEMS

2.11 CONTROL AUTOMÁTICO DE SISTEMAS

Un diagrama de bloques típico de un sistema de control retroalimentado se muestra en la Figura. El sistema está constituido de tres bloques principales: el proceso a ser controlado, medición y el controlador. La salida del sistema será medida y convertida a una señal equivalente eléctrica usando electrónica adecuada. La señal que representa la salida, $c(t)$, es comparada con la señal de entrada de referencia, $r(t)$, resultando en una señal de error, $e(t)$. Esta señal de error activa al controlador para generar la acción en la señal de control, $m(t)$.

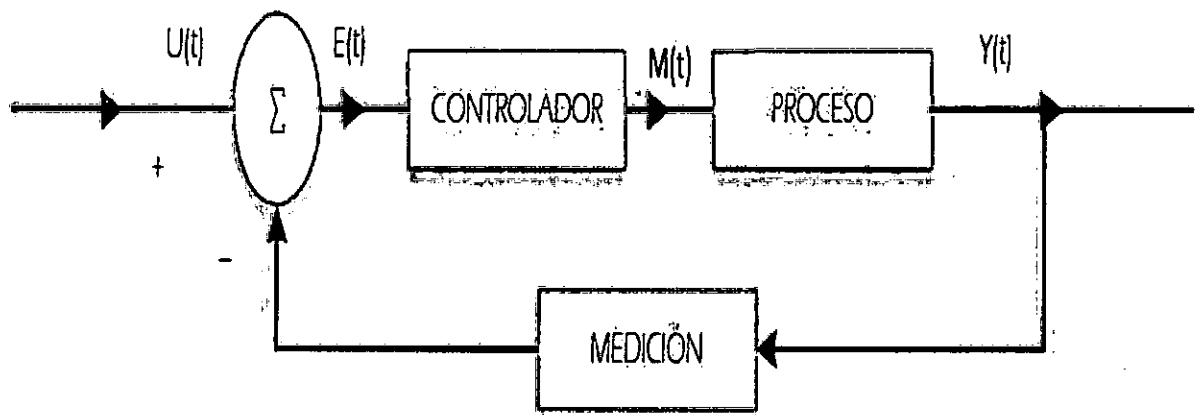


FIG. 19 DIAGRAMA TÍPICO DE UN SISTEMA DE CONTROL RETROALIMENTADO

Las señales mencionadas anteriormente están expresadas en el dominio del tiempo, es decir, que se describe su comportamiento en el dominio del tiempo. El sistema esta descrito usando una ecuación diferencial con la derivada del tiempo dy/dt como operador básico. El sistema puede estar equivalentemente descrito en el dominio de la frecuencia, o en el dominio-s. El operador de Laplace, s , es el operador básico usado para la descripción de sistemas en el dominio s . Es equivalente al operador derivada del dominio del tiempo (con condiciones iniciales iguales a cero). El operador derivada es también equivalente al operador $j\omega$, para señales seno, el cual es usado en el dominio de la frecuencia para describir un sistema.

Los objetivos del análisis de un sistema retroalimentado dado son principalmente para determinar:

- La estabilidad y el grado del sistema.
- La respuesta transitoria.
- La respuesta en estado estacionario.

Se dice que un sistema es estable si su salida no oscila o incrementa hasta el infinito.

Para analizar un sistema de control retroalimentado es necesario:

- Determinar un modelo matemático para cada uno de los bloques funcionales de sistema. Las funciones de transferencia son lo más conveniente para usar para éste propósito.

- Representar al sistema usando un diagrama a bloques y determinar su función de transferencia total.
- Determinar las características por medio de Respuesta a una señal Escalón, Mapas de Polos y Ceros, Lugar Geométrico de las Raíces, Gráficas de Bode, Diagrama de Nyquist o Carta de Nichols.

Un esquema de control comúnmente utilizado es conocido como el controlador PID de tres términos, donde PID representa Proporcional Integral Derivativo. Es también usado como Benchmark y cualquier otro esquema de control para ser comparado. El concepto de PID se muestra en la Figura.

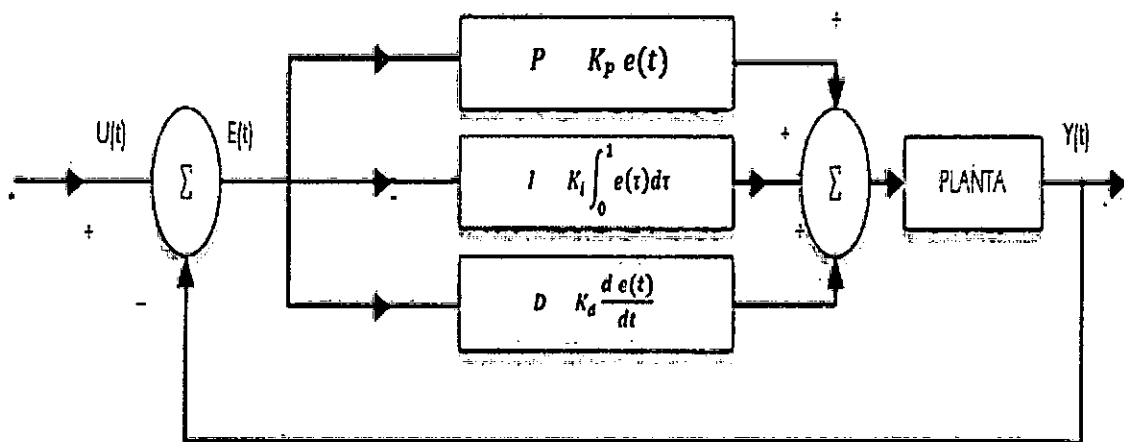


FIG. 20 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR PID

Las técnicas de control han evolucionado con el pasar de los años. De hecho, hoy en día existe una amplia gama de métodos de control, entre los cuales destacan los clásicos controladores P, PI, PD y PID, o algunas formas modificadas de éstos, los cuales continúan utilizándose ampliamente aun cuando han aparecido novedosas técnicas de control en los últimos años. De hecho, "más de la mitad de los controladores

industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID o PID modificado”

En cuanto a las diferentes acciones de control se tiene:

2.11.1 Acción proporcional

Consiste, básicamente, en un amplificador de ganancia sintonizable que se agrega a la planta de un sistema de control con la finalidad de disminuir el tiempo de subida y disminuir el error en estado estacionario. Sin embargo, esta acción de control incrementa el sobrepico e incrementa las oscilaciones del sistema, a mayor acción proporcional se tendrá un menor error en estado estacionario pero, también, se tendrá un mayor sobrepico y un mayor número de oscilaciones.

La acción proporcional actúa en función de cuán lejos se está del objetivo de control. En este sentido se tiene que la salida es proporcional al error y tiene la forma de la ecuación:

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

$$e(t) = y(t) - r(t)$$

Dónde: $u(t)$: Salida de la acción proporcional

K_p : Constante de proporcionalidad

$e(t)$: Error del sistema

$y(t)$: Salida del sistema

$r(t)$: Punto de referencia

Aplicando Transformada de Laplace:

$$U(S) = K_p \cdot E(S)$$

2.11.2 Acción integral

Actúa en función a cuán rápido se llega al objetivo de control. En esta acción de control la salida es proporcional a la integral del error, es decir, la acción integral suma el error en cada ciclo. A medida que al sistema le tome más tiempo alcanzar el objetivo de control la salida de la acción integral se incrementará, ya que la integral del error aumenta. Se trata de un tipo de acción lenta que hace que el error en estado estacionario sea igual a cero para una entrada escalón, pero que, al mismo tiempo, incrementa el número de oscilaciones y hace más inestable el sistema al añadir un polo en el origen, razón por la cual esta acción se utiliza conjuntamente con la acción proporcional.

La salida de la acción integral es diferente de cero aun cuando el error del sistema sea igual a cero. Dicha salida se define según la ecuación

$$u(t) = K_i * \int e(t).dt$$

Ki: Constante Integral

Aplicando transformada de Laplace:

$$U(S) = K_i \cdot \frac{E(S)}{s}$$

2.11.3 Acción derivativa

Actúa en función a cuán variable es el error. Este tipo de acción es anticipativa y de previsión y actúa sobre cambios repentinos del error. La

salida es proporcional a la derivada del error, lo que permite que se pueda hacer cierta predicción de la señal del error.

La acción derivativa no actúa directamente sobre el error del sistema, razón por la cual nunca se utiliza sola. Entre las ventajas de esta acción de control se tiene que el sistema se hace más estable, se añade amortiguación al sistema (menos oscilaciones) y hace que el sistema sea más rápido. Sin embargo, la acción derivativa puede saturar al actuador y amplificar señales de ruido.

La salida de la acción derivativa viene dada por la ecuación:

$$u(t) = K_d * \frac{de(t)}{dt}$$

K_d : Constante Derivativa

Aplicando Transformada de Laplace:

$$U(S) = K_d * s * E(S)$$

Por otro lado, estas acciones de control se combinan para ser aplicadas a los sistemas físicos, ya que como se dijo anteriormente ni la acción integral ni la derivativa pueden aplicarse por sí solas. De forma que, se encuentran controladores PI, PD y PID, cuyas relaciones entre la salida y la señal error se presentan a continuación:

Control PI:

$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} * \int e(t).dt$$

Aplicando Transformada de Laplace:

$$U(S) = K_p * E(S) + \frac{K_p}{T_i} * \frac{E(S)}{s}$$

Control PD:

$$u(t) = K_p * e(t) + K_p * T_d * \frac{de(t)}{dt}$$

Aplicando Transformada de Laplace:

$$U(S) = K_p * E(S) + K_p * T_d * s * E(S)$$

Control PID:

$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} * \int e(t).dt + K_p * T_d * \frac{de(t)}{dt}$$

$$U(S) = K_p * E(S) + \frac{K_p}{T_i} * \frac{E(S)}{s} + K_p * T_d * s * E(S)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$$K_d = K_p * T_d$$

Ti: Tiempo Integral

Td: Tiempo Derivativo

Así, cada controlador poseerá las características combinadas de las acciones de control que este contenga, tomando en cuenta, obviamente, que la variación de una de ellas afectará, también, a las otras, ya que hay cierta dependencia. De igual forma, la combinación de dichas acciones de control dependerá de cada situación y de los requerimientos en régimen estacionario y en régimen transitorio que se presenten.

En la tabla 2.1 se presenta una comparación general entre los controladores Proporcional (P), Proporcional-Integral (PI) y Proporcional-Derivativo (PD), tomando en cuenta que ni la acción integral ni la derivativa pueden aplicarse por sí solas.

Acción de control	Tiempo de subida	Tiempo de establecimiento	Sobrepico	Error en estado estacionario	Oscilaciones
Proporcional	Disminuye	Variación menor	Aumenta	Disminuye	Aumenta
Proporcional Integral	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Se hace cero	Aumenta
Proporcional Derivativo	Variación menor	Disminuye	Disminuye	Variación menor	Disminuye

Tabla 1 Comparación general de los controladores P, PI y PD

CAPITULO III

3 MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 DISEÑO DEL ROBOT

El diseño de un sistema de control de una plataforma de dos ruedas consiste en modelar la estructura física, la cual está constituida por diferentes componentes de hardware, incluyendo un micro-controlador y diversos sensores. Así mismo, incluye programar y realizar pruebas en el dispositivo, lo que involucra el uso de diferentes paquetes de software.

En el presente trabajo de investigación se desarrolló e implementó un algoritmo de control, basado en un controlador PID, utilizando un método de sintonización Ziegler-Nichols y un filtro complementario para la obtención de los datos provenientes de dos sensores, un acelerómetro y un giróscopo, para lograr el equilibrio de dicha plataforma, de una forma rápida y permanente. En las secciones siguientes se describen las dos partes esenciales del diseño del sistema de control de la plataforma de dos ruedas, el hardware y el software, y cómo se interconectan para lograr un buen funcionamiento de la estructura del robot.

3.2 Estructura física del robot

El diseño del robot fue modificado en diferentes oportunidades del proyecto a objeto de mejorar el comportamiento de la plataforma móvil, tomando en cuenta su altura, peso y la distribución equitativa del mismo.

El robot, incorporaba los siguientes elementos:

- Bastidor de aluminio con dos niveles
- Ruedas del robot de 10cm de radio

- Controlador (driver) del motor MD25-H Bridge Motor Drive
- Controlador (driver) del motor JSMOTOR-A utilizado para el movimiento de la carga útil metálica de 50 Kg.
- Paquete de baterías (8 baterías AA)

La estructura de la plataforma móvil está conformada principalmente por barras o placas de aluminio para el soporte de los diferentes componentes electrónicos (motores, microcontrolador, sensores, entre otros). El microcontrolador, así como los drivers de los motores y ciertos reguladores de voltaje se encuentran en la placa superior del robot, mientras que los sensores se encuentran en la placa inferior del robot, ubicados muy cerca de las ruedas del mismo. Así mismo tiene soportes de aluminio con pequeñas ruedas en la base del dispositivo, para evitar que el robot se caiga cuando su mecanismo de control no se encuentre operativo.

3.3 Arduino Uno

Microcontrolador ATmega328 y oscilador de cristal a 16 MHz. Presenta 14 pines de entrada/salida digitales, 6 de los cuales pueden ser usados como PWM. Dispone también de 6 entradas analógicas, conexión USB e ICSP. Permite, al igual que la placa anterior comunicación serie, SPI y TWI. Esta fue la opción elegida para comenzar a trabajar.

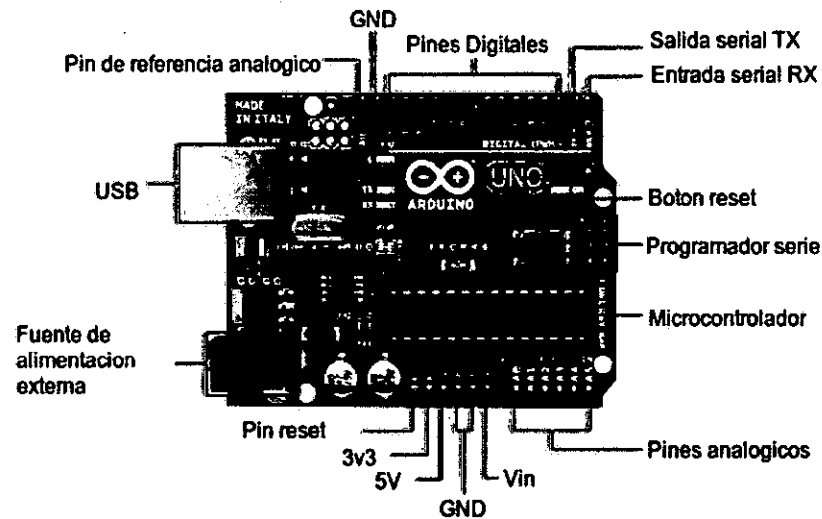


FIG. 21 ELEMENTOS DESTACADOS DEL ARDUINO UNO.

3.4 Estrategia de control

La importancia del algoritmo es principalmente controlar la rapidez y la dirección de los motores. El controlador debe leer los valores de los sensores, compararlos con el valor de referencia, y minimizar el error entre ellos en todo momento. Si el error es positivo, el robot debe desplazarse hacia una dirección; y si el error es negativo, el dispositivo debe moverse en la dirección opuesta al desplazamiento anterior. Estos movimientos se determinan mediante la velocidad de las ruedas, la cual es proporcional al error calculado. La posición de equilibrio se logra una vez que el error sea cero (0), o muy cercano a cero (0), durante la mayor parte del tiempo. El proceso de control se muestra en la figura siguiente.

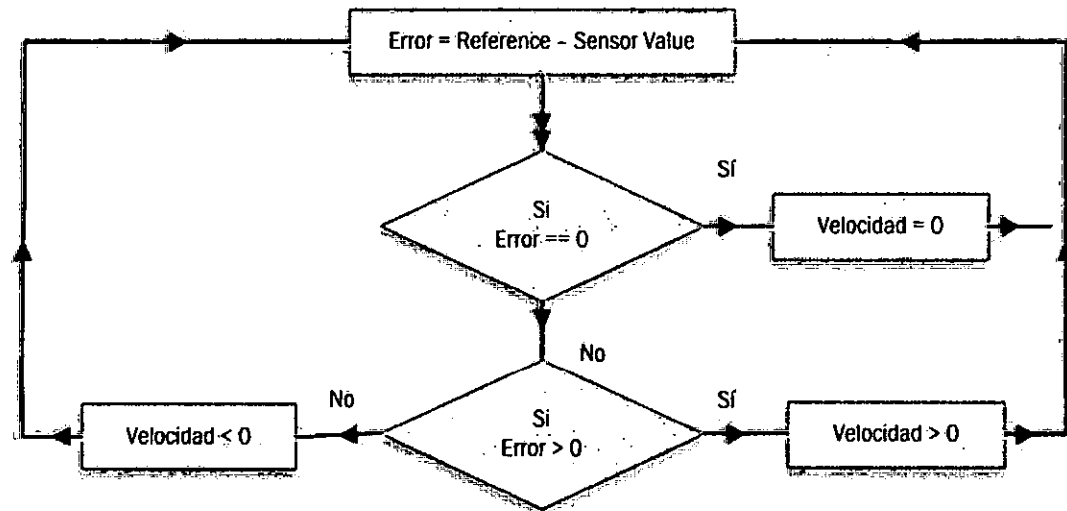


FIG. 22 proceso de control implementado para una plataforma móvil

Como se mencionó, hay diversos algoritmos de control asociados a plataformas de dos ruedas: Controlador PD, Controlador de realimentación, Controladores de Lógica Difusa (Fuzzy Logic Control), y combinaciones de Controladores PID con Controladores Feed-Forward.

Se eligió un controlador PID para ser implementado en esta plataforma específica debido a la sencillez de su sintonización para la obtención de las ganancias, proporcional, derivativa, e integral, así como a la respuesta rápida y sin error en estado estacionario que presenta dicho controlador. Primero, se logró el equilibrio de la plataforma y posteriormente, se realizaron pruebas con la carga útil colocada en el dispositivo en una posición determinada, para observar el buen funcionamiento de la plataforma al modificarle su centro de masa.

El algoritmo de control que se implementó en el presente proyecto de investigación se fundamenta principalmente en mover las ruedas de la plataforma hacia la dirección a la cual ésta se está inclinando.

El esquema del controlador PID que se utilizó en el presente proyecto se muestra en la Figura. La entrada del sistema es la posición angular ideal del robot móvil, es decir, su punto de equilibrio vertical. El error es la relación entre la referencia fijada como posición angular ideal y la posición actual del sistema. Este error es la entrada del controlador (microprocesador), el cual genera una señal que es enviada a los motores para controlar las ruedas. La posición angular resultante del sistema es medida nuevamente por los sensores y comparada con la referencia del sistema.

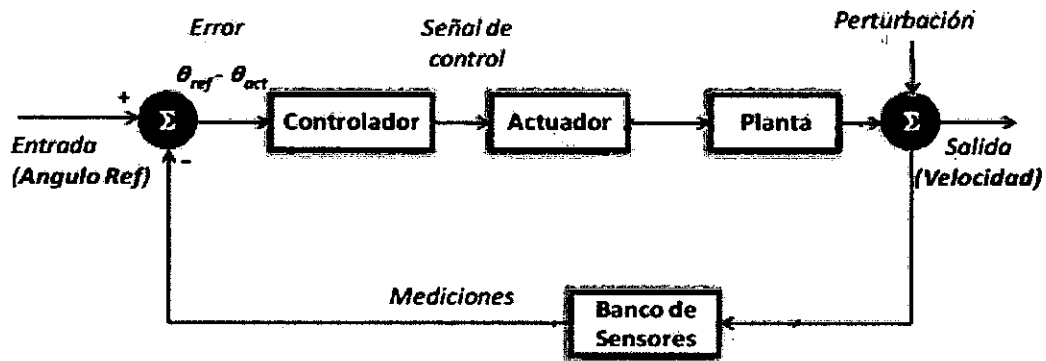


FIG. 23 Diagrama de controlador PID

Las ganancias del controlador PID fueron calculadas utilizando el método de sintonización Ziegler-Nichols. La frecuencia de muestreo, a la cual el micro-controlador obtuvo los datos provenientes de los sensores, fue variable. La frecuencia de muestreo ideal es aquella a la cual se observa el mejor comportamiento de la plataforma móvil en su punto de equilibrio. El algoritmo descrito anteriormente puede resumirse en el diagrama de flujo mostrado en la Figura.

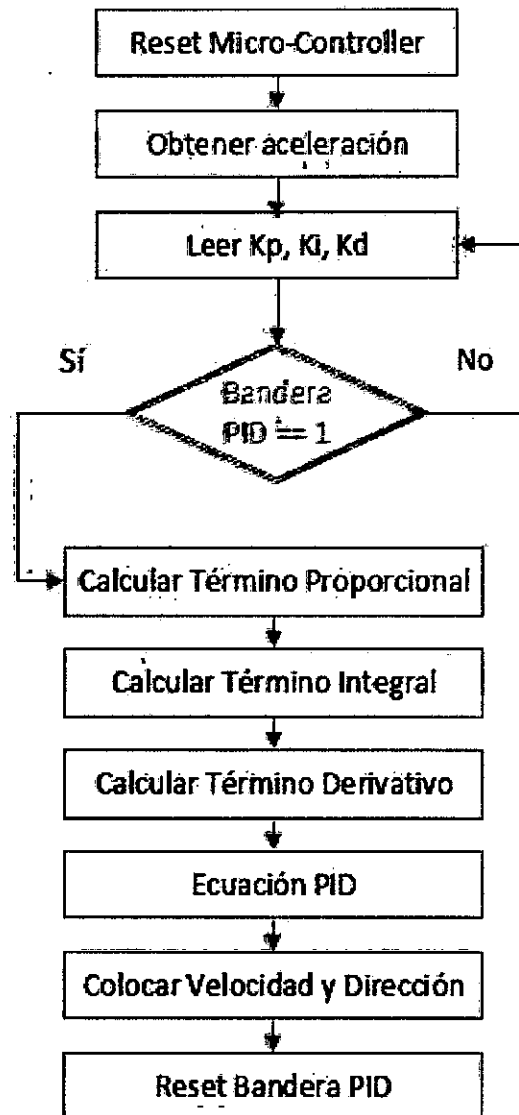


FIG. 24 Diagrama de flujo del algoritmo de control implementado para el equilibrio y el balance de una plataforma de dos ruedas

Mediante la utilización de un método de ensayo y error, se observaron diferentes comportamientos del robot. Las diferencias principales en dicho comportamiento se basan en el valor de la velocidad de las ruedas y el período de tiempo que tardó la plataforma en lograr la posición de equilibrio y estabilizarse por completo.

3.5 MPU6050

El principal objetivo de utilizar sensores como el acelerómetro y/o el giróscopo es medir el ángulo de inclinación de la plataforma de dos ruedas.

3.5.1 Especificaciones técnicas.

El sensor escogido, el IMU MPU6050 del fabricante InvenSense, presenta las siguientes características:

3.5.1.1 Giróscopo:

Sistema de giróscopo en 3 ejes fabricado con tecnología MEMS.

Puede ser ajustado a valores de ± 250 , ± 500 , ± 1000 , y ± 2000 °/s.

Integra 3 conversores analógico digital de 16 bits, uno por cada eje.

Dispone de un filtro paso bajo programable

Consume 3.6mA.

Dispone de self-test programable.

3.5.1.2 Acelerómetro:

Sistema de acelerómetro en 3 ejes fabricado con tecnología MEMS.

Ajustable a valores de sensibilidad de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ y $\pm 16g$.

Integra 3 conversores analógico digital de 16 bits, uno por cada eje.

Consumo de 500 μ A.

Dispone de interrupciones programables.

Detección de caída libre, vibraciones y movimiento 0.

Dispone de self-test programable.

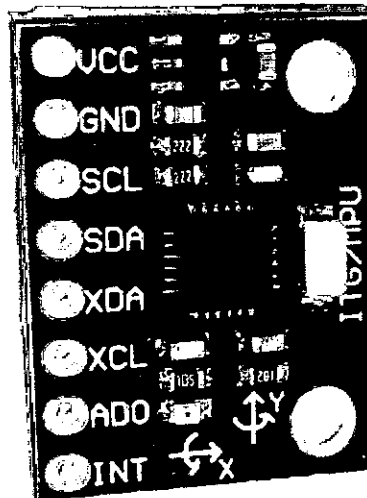


FIG. 25 MPU6050

- Otras:

Posibilidad de ser ampliado con un magnetómetro a un sistema de 9 grados de libertad.

Master auxiliar para comunicación I2C.

Regulador de tensión propio.

Buffer o memoria de 1024 bytes FIFO.

Sensor de temperatura.

Filtros programables por el usuario para los acelerómetros, los giróscopos y el sensor de temperatura.

Dispone de un DMP (Digital Motion Processor), un procesador disponible para el usuario que permitiría descargar de trabajo al microcontrolador principal.

Interfaces de comunicación SPI e I2C primaria y secundaria.

3.5.2 Comunicación I2C.

I2C es un bus de transmisión de datos en serie creado en 1992 por Philips. La velocidad de comunicación es de 100 kbit/s aunque puede aumentar hasta 3.4 Mbit/s. Es un sistema muy extendido en la comunicación entre microcontroladores y sus periféricos.

Utiliza 2 líneas de transmisión, SDA (Serial Data Line) por la que circulan los datos, y SCL (Serial Clock Line) en la que se envía la señal de reloj. Cada dispositivo conectado al bus tiene una dirección asignada.

La transmisión es iniciada por el dispositivo maestro, que además proporciona la señal de reloj. Tiene la forma:

1→ START /Bits dirección de esclavo/Bit RW/Bit Ack/ Byte dirección de memoria / Bit ACK / Byte de datos / Bit ACK /Bit ACK / STOP /

2→ Master / Master /Master/ Slave / Master Slave / Master-Slave /(/ Slave-Master /Master/

Bit de RW, 0 es Leer y 1 Escribir.

Bit de ACK (Acknowledge).

Master – Slave según sea lectura-escritura.

Una ventaja de este método de conexión con el sensor es la existencia para Arduino de la librería Wire, en la que se incluyen funciones para este tipo de comunicación.

3.6 CONTROLADOR PID

El controlador PID se puede resumir en tres (3) componentes principales explicadas en las secciones anteriores. La constante proporcional K_p que afecta directamente al ángulo de inclinación calculado mediante el filtro complementario descrito en la sección anterior. El error que se refiere al ángulo de inclinación de la plataforma con respecto a la posición de equilibrio vertical de la plataforma (0° grados), utilizando únicamente el acelerómetro como sensor. La constante integral K_i , la cual está relacionada con la integración numérica del ángulo de inclinación. Para este término, es necesario implementar una función para evitar su saturación, es decir, para que el término integral no exceda un valor máximo definido, causando un comportamiento inestable del robot (función anti-windup). Por último la constante derivativa K_d que multiplicará al valor de velocidad angular proveniente del giróscopo.

3.7 ETAPA DE POTENCIA

Este controlador usa los Chips Infineon BTS7960 como puente H para permitir el control de motores, cuenta con un protector ante sobrecalentamiento y sobrecorriente. Este módulo cuenta con un aislador que permite separa el circuito de control de la parte de potencia para mantener la integridad del dispositivo, puesto que este driver puede llegar a generar una corriente de hasta 43A.

El BTS7960 contiene dos transistores MOSFET de tipo P y N con un controlador IC en un solo paquete, lo cual permite la conexión de interfaz a un dispositivo externo de control, como lo puede ser un microcontrolador, ya que este cuenta con entrada de tipo lógico, ajuste de velocidad, generación de tiempo muerto y protección contra exceso de temperatura, sobretensión, baja tensión, sobrecorriente y corto circuito.

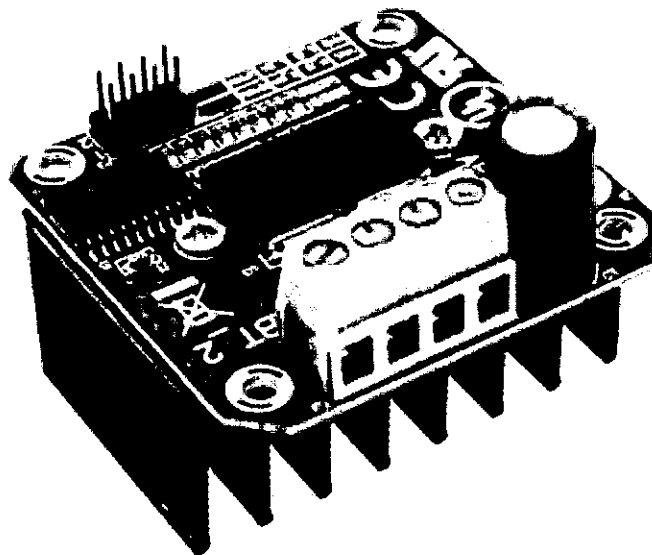


FIG. 26 Puente H BTS7960 De 43A

Aquí está un diseño del módulo de potencia del motor con todas las funciones que es capaz de alimentar.

Características:

- Chips: BTS7960
- Chip Buffer: Schmitt-trigger 74AHC244D
- Voltaje de operación: 5.5V~27V
- Corriente de operación máxima: 43A

- Protección Sobrecorriente
- Baja corriente de reposo: 7uA a 25°C
- Entradas lógicas: Si
- Tasa de respuesta ajustable EMI
- Señal PWM: Dos canales
- Frecuencia de reloj: 25KH

3.8 FILTRO COMPLEMENTARIO

El uso de los ángulos obtenidos mediante las funciones del apartado anterior puede presentar problemas o inconvenientes como offsets, los ruidos de las medidas con los acelerómetros, que pueden indicar valores falsos, o derivas producidas al tener que integrar los valores del giróscopo. Para poder obtener medidas que se ajusten lo máximo posible a la realidad del sistema, necesitaremos de algún otro medio como el filtro complementario.

El uso de este método requiere de un acondicionamiento previo de los valores obtenidos. También es necesario ajustar o escalar los datos obtenidos por los sensores de una forma adecuada, esto se hará teniendo en cuenta la sensibilidad de obtención de ángulos. Obtendremos así los datos de ángulo deseados.

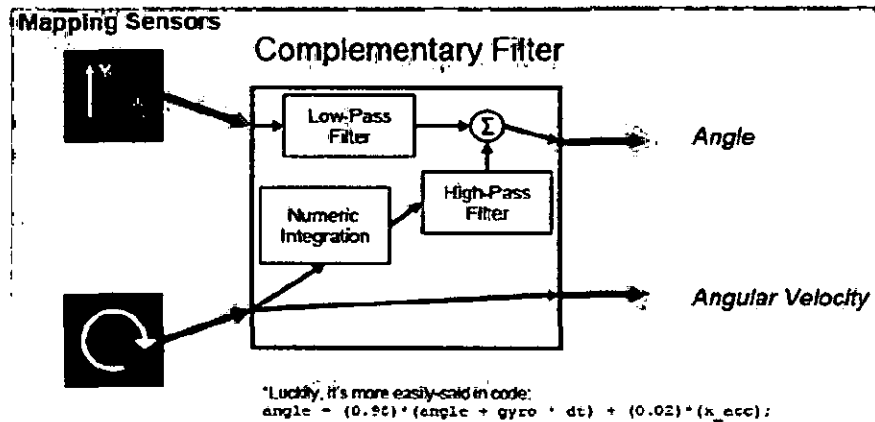


FIG. 27 DIAGRAMA FILTRO COMPLEMENTARIO

El filtro complementario basa su actuación en los siguientes puntos:

- Fórmula:

Ángulo = (valor filtro paso alto)*(ángulo + valor integrado del giróscopo) +
 (valor filtro paso bajo)*(valor del acelerómetro);

- Filtro paso bajo: este tipo de filtro no deja pasar cambios rápidos, como en la medida obtenida de los acelerómetros. De esta manera eliminamos el ruido propio de este sensor.

- Integración: como se ha comentado previamente, este elemento es necesario para obtener el ángulo a partir de medidas de velocidad angular.

Ángulo giróscopo = ángulo previo + valor del giróscopo * tiempo

- Filtro paso alto: es el método empleado para eliminar la deriva de los giróscopos. Este tipo de filtro funciona de manera contraria al paso bajo, permitiendo el paso de cambios rápidos y evitando el de cambios lentos (deriva).

- Constante de tiempo: a la hora de obtener los valores para los filtros, es tenido en cuenta la velocidad a la que se muestrea el sistema o se realiza

el bucle de medida, así como hasta qué punto actuará en las señales de los sensores.

- Complementario: indica que las 2 partes que componen el filtro suman 1.

Apreciable en los términos (valor filtro paso alto) y $(1 - \text{valor filtro paso alto})$.

CAPITULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se desarrollaran los diferentes apartados que han servido para la construcción del robot segway.

Se ha implementado un control PID en la tarjeta Arduino Uno.

El programa está dividido en 3 partes diferenciadas:

- a. Adquisición de la posición de equilibrio: el sensor realiza medidas de la posición de equilibrio para obtener la posición vertical. El Set-Point del controlador siempre va a ser 0°.
- b. Calculo de la acción de control mediante PID: Se calcula la acción de control mediante la comparación del ángulo inicial y la que se va midiendo continuamente mediante el citado sensor.

PARTE PROPORCIONAL

$$\text{Accion proporcional} = \text{error} * K_p$$

Siendo el error,

$$\text{error} = \text{setpoint} - \text{valor actual}$$

Además de esto, el programa incorpora un bucle para conseguir una mayor rapidez de respuesta cuando el error se hace muy grande. Esto se consigue incrementando el valor de la acción proporcional cuando el robot se encuentra en dicha situación.

PARTE INTEGRAL

En el esquema se sigue la formula siguiente correspondiente a la acción integral,

$$\text{Accion integral} = \text{error anterior} + \text{error} * \text{tiempo} * K_i$$

En los controladores integrales se puede dar un efecto llamado windup. Esto ocurre cuando la acción de los motores se satura (el motor tiene un límite de velocidad), ya que aunque esta se encuentre saturada, el controlador integral sigue integrando el error haciéndose este cada vez mayor. Como consecuencia de que el error se prolongue en el tiempo, puede darse la situación de que aunque este se reduzca la acción derivativa nos lleve a dar una respuesta mayor de la necesaria

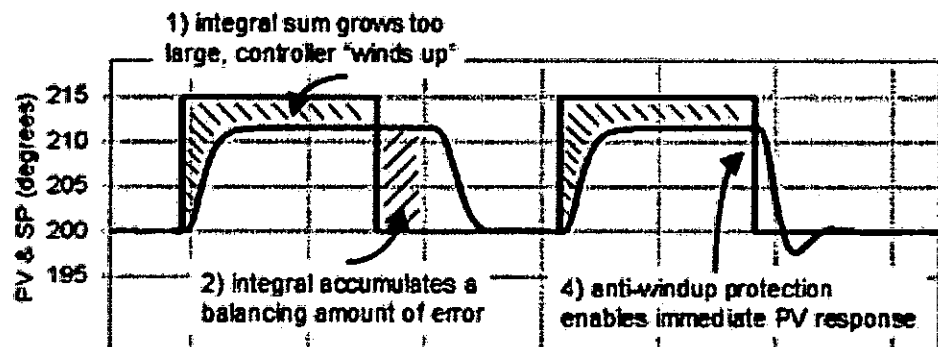


FIG. 28 Explicación grafica del efecto windup

Para evitar este efecto se pueden seguir tres métodos:

- Limitación del término integral
- Integración condicional
- Seguimiento integral

PARTE DERIVATIVA

La acción derivativa se anticipa a lo que va a suceder para conseguir estabilizar el robot. Sigue la siguiente fórmula:

$$\text{Accion derivativa} = \text{valor actual} - \text{valor anterior} * (Kd / \text{tiempo})$$

Para conseguir la acción final del PID se combinan las tres acciones previamente descritas que forman la acción de control siguiente:

$$\text{Accion de control} = \text{Accion proporcional} + \text{Accion integral} - \text{Accion derivativa}$$

c. Aplicación de la acción de control a los servomotores:

Una vez que la acción de control ha sido generada, se procede a aplicarla a los actuadores. Dependiendo del signo del error o si es 0 se siguen distintos caminos.

Error > 0 (el robot está inclinado hacia adelante) El bloque que acciona los motores los hace girar hacia adelante para compensar la caída hacia ese lado.

Error < 0 (el robot está inclinado hacia atrás) El bloque que acciona los motores los hace girar hacia atrás para compensar la caída hacia ese lado.

Error = 0 Los motores permanecen parados.

Determinación de los parámetros del PID

Para la determinación de los parámetros del PID diseñado anteriormente se utilizaron dos métodos. El primero de ellos se realizó utilizando el bloque pre-establecido en Labview con nombre "Auto-tuning PID" y se obtuvieron los siguientes resultados.

Una vez obtenidos los parámetros del bloque, se ajustan los parámetros de forma manual llegando a los siguientes parámetros para el PID:

- Kp = 40

- Ki = 80

- $K_d = 5$

Las conexiones de la tarjeta con los sensores y el actuador, se presenta a continuación:

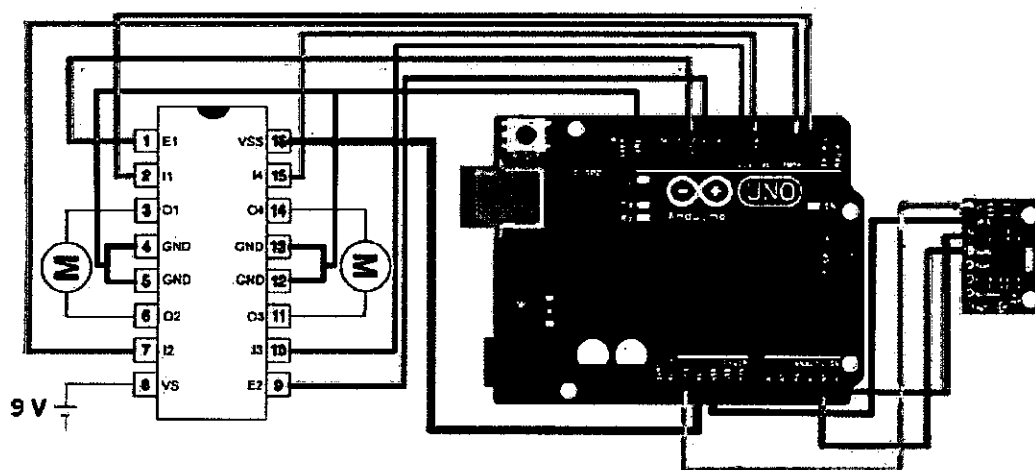


FIG. 29 Conexionado de los componentes electrónicos que conforman el segway

La parte más destacable de las conexiones se sitúa en los pines 9 y 10 de la placa Arduino (cables rojo y verde). Dichos pines son aptos para emitir una señal PWM, la cual habilitará o deshabilitará los motores consiguiendo así un control de la potencia que se les aplica.

SINTONIZACIÓN DEL PID

Para la sintonización del PID en un principio se ha recurrido al método de Ziegler-Nichols. El procedimiento es el siguiente:

1. Aplicar a la planta sólo control proporcional con ganancia K_p pequeña.
2. Aumentar el valor de K_p hasta que el lazo comience a oscilar. La oscilación debe ser lineal y debe detectarse en la salida del controlador ($u(t)$).

3. Registrar la ganancia crítica $K_p = K_u$ y el período de oscilación T_u de $u(t)$, a la salida del controlador.
4. Ajustar los parámetros del controlador PID de acuerdo al apartado "PID" del siguiente cuadro.

Método Ziegler-Nichols			
TIPO DE CONTROL	K_p	K_i	K_d
P	$0,5 * K_u$	*****	*****
PI	$0,45 * K_u$	$1,2 * (K_u / T_u)$	*****
PD	$0,8 * K_u$	*****	$K_p * T_u / 8$
PID	$0,6 * K_u$	$2 * K_p / T_u$	$K_p * T_u / 8$

FIG. 30 Ajuste de parámetros de PID

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

$$K_p = 33$$

$$K_i = 151.51$$

$$K_d = 7.26$$

Los valores obtenidos no daban como resultado una estabilización del robot por lo que posteriormente se inició un barrido de las constantes partiendo de las anteriormente conseguidas. Finalmente se obtuvieron los siguientes valores:

$$K_p = 30$$

$$K_i = 10.$$

$K_d = 40$

Se realizó una reducción drástica de la constante integradora para conseguir eliminar el efecto wind-up. También se incremento en consideración la variable correspondiente a la parte derivativa del PID, para lograr una gran estabilidad en el robot.

CAPITULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente proyecto de investigación, combina diferentes áreas de ingeniería, mecánica, electrónica, computación y control. Esta es una combinación ideal para el diseño de algoritmos, la implementación de códigos y la solución a las dificultades que surgen en tiempo real.

El funcionamiento conceptual de la plataforma móvil de dos ruedas se basó en un modelo de péndulo invertido y para lograr el balance del robot se diseñó un algoritmo de control que permitiera el equilibrio y estabilidad de la plataforma. El diseño del algoritmo de control y la implementación en tiempo real de dicho algoritmo en el dispositivo, exigió desarrollar los programas respectivos en lenguaje C, los cuales se compilaron y se grabaron en el Arduino Uno seleccionado para realizar las pruebas. A través del empleo de una combinación del adecuado hardware y software se obtuvieron los resultados exitosos en el funcionamiento del dispositivo en tiempo real.

Es de hacer notar que además de lo anterior se debieron realizar algunas modificaciones en la ubicación de ciertos componentes de la plataforma, a objeto de mejorar las especificaciones mecánicas (peso y balance) de la plataforma.

Se implementaron soluciones utilizando los sensores, acelerómetro y giróscopo, por separado, con las cuales no se obtuvo el resultado esperado, debido principalmente a que la información del acelerómetro contenía mucho ruido y que el giróscopo por razones intrínsecas del

dispositivo presentaba desviaciones en sus mediciones, que no permitían la estabilidad y equilibrio de la plataforma. Finalmente, el objetivo del proyecto, implementar el algoritmo de control para lograr el equilibrio y estabilizar la plataforma, se logró utilizando la combinación de los dos sensores de movimiento, que midieron aceleración y velocidad angular del dispositivo, para el cálculo del ángulo de inclinación de la estructura con respecto a la posición vertical de equilibrio, un filtro complementario y un controlador tipo PID.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KATSUHIKO OGATA (1987) "Discrete-Time Control Systems". USA. Prentice Hall.
2. Goher, K. (2010) "Dynamic modeling and control of a two-wheeled robotic machine with an extended rod". Tesis de Doctorado. Universidad de Sheffield, Reino Unido
3. http://www.tv.uvigo.es/uploads/material/Video/1709/ISAD_Tema7_1.pdf.
4. <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/actuadores.pdf>.
5. <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>

ANEXOS

BTS7960

**High Current PN Half Bridge
NovalithIC™**

BTS 7960B

BTS 7960P

Product Summary

The **BTS 7960** is a fully integrated high current half bridge for motor drive applications. It is part of the **NovalithIC™** family containing one p-channel highside MOSFET and one n-channel lowside MOSFET with an integrated driver IC in one package. Due to the p-channel highside switch the need for a charge pump is eliminated thus minimizing EMI. Interfacing to a microcontroller is made easy by the integrated driver IC which features logic level inputs, diagnosis with current sense, slew rate adjustment, dead time generation and protection against overtemperature, overvoltage, undervoltage, overcurrent and short circuit.

The **BTS 7960** provides a cost optimized solution for protected high current PWM motor drives with very low board space consumption.

**BTS 7960B
P-TO-263-7**



**BTS 7960P
P-TO-220-7**

**Basic Features**

- Path resistance of typ. 16 mΩ @ 25 °C
- Low quiescent current of typ. 7 μA @ 25 °C
- PWM capability of up to 25 kHz combined with active freewheeling
- Switched mode current limitation for reduced power dissipation in overcurrent
- Current limitation level of 43 A typ.
- Status flag diagnosis with current sense capability
- Overtemperature shut down with latch behaviour
- Overvoltage lock out
- Undervoltage shut down
- Driver circuit with logic level inputs
- Adjustable slew rates for optimized EMI

Type	Ordering Code	Package
BTS 7960B	Q67060-S6160	P-TO-263-7
BTS 7960P	on request	P-TO-220-7



3 Maximum Ratings

-40 °C < T_J < 150 °C (unless otherwise specified)

Pos	Parameter	Symbol	Limits		Unit	Test Condition
			min	max		
Electrical Maximum Ratings						
3.0.1	Supply voltage	V_{VS}	-0.3	45	V	
3.0.2	Logic Input Voltage	V_{IN} V_{INH}	-0.3	5.3	V	
3.0.3	HS/LS continuous drain current	$I_{D(HS)}$ $I_{D(LS)}$	-40	40 ¹⁾	A	$T_C < 85^{\circ}\text{C}$ switch active
3.0.4	HS pulsed drain current	$I_{D(HS)}$	-60	60 ¹⁾	A	$T_C < 85^{\circ}\text{C}$
3.0.5	LS pulsed drain current	$I_{D(LS)}$	-60	60 ¹⁾	A	$t_{\text{pulse}} = 10\text{ms}$
3.0.6	Voltage at SR pin	V_{SR}	-0.3	1.0	V	
3.0.7	Voltage between VS and IS pin	$V_{VS} - V_{IS}$	-0.3	45	V	
3.0.8	Voltage at IS pin	V_{IS}	-20	45	V	
Thermal Maximum Ratings						
3.0.9	Junction temperature	T_J	-40	150	$^{\circ}\text{C}$	
3.0.10	Storage temperature	T_{stg}	-55	150	$^{\circ}\text{C}$	
ESD Susceptibility						
3.0.11	ESD susceptibility HBM	V_{ESD}			kV	according to EIA/ JESD 22-A 114B
	IN, INH, SR, IS OUT, GND, VS		-2 -6	2 6		

¹⁾ Maximum reachable current may be smaller depending on current limitation level

Note: Maximum ratings are absolute ratings; exceeding any one of these values may cause irreversible damage to the device. Exposure to maximum rating conditions for extended periods of time may affect device reliability

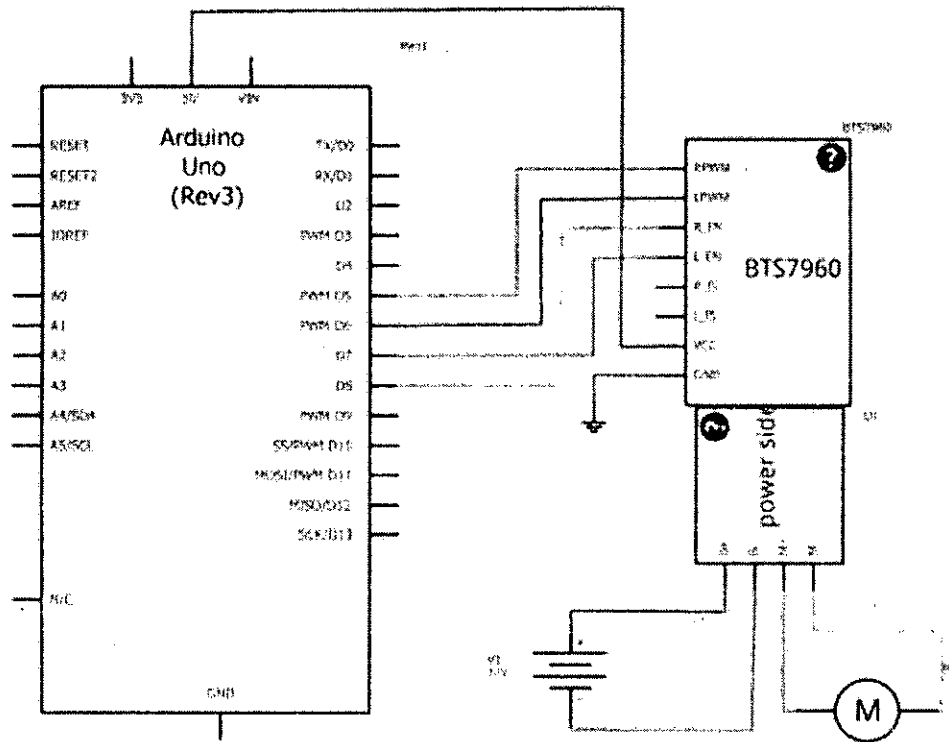
Block Description and Characteristics

4.3.6 Electrical Characteristics - Protection Functions

– $-40\text{ }^{\circ}\text{C} < T_J < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$; $8\text{ V} < V_S < 18\text{ V}$ (unless otherwise specified)

Pos.	Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Conditions
			min.	typ.	max.		
Under Voltage Shut Down							
4.3.1	Switch-ON voltage	$V_{UV(ON)}$	–	–	5.5	V	V_S increasing
4.3.2	Switch-OFF voltage	$V_{UV(OFF)}$	4.0	–	5.4	V	V_S decreasing
4.3.3	ON/OFF hysteresis	$V_{UV(HY)}$	–	0.2	–	V	–
Over Voltage Lock Out							
4.3.4	Switch-ON voltage	$V_{OV(ON)}$	27.5	–	–	V	V_S decreasing
4.3.5	Switch-OFF voltage	$V_{OV(OFF)}$	27.6	–	30	V	V_S increasing
4.3.6	ON/OFF hysteresis	$V_{OV(HY)}$	–	0.2	–	V	–
Current Limitation							
4.3.7	Current limitation detection level high side	I_{CLH0}	47 44 43	62 60 59	84 80 79	A	$V_S=13.5\text{ V}$ $T_J = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_J = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_J = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
4.3.8	Current limitation detection level low side	I_{CLL0}	36 34 33	47 43 42	64 61 61	A	$V_S=13.5\text{ V}$ $T_J = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_J = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_J = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
Current Limitation Timing							
4.3.9	Shut off time for HS and LS	t_{CLS}	70	115	210	μs	$V_S=13.5\text{ V}$
Thermal Shut Down							
4.3.10	Thermal shut down junction temperature	T_{JSD}	152	175	200	$^{\circ}\text{C}$	–
4.3.11	Thermal switch on junction temperature	T_{Jso}	150	–	190	$^{\circ}\text{C}$	–
4.3.12	Thermal hysteresis	ΔT	–	7	–	K	–
4.3.13	Reset pulse at INH pin (INH low)	t_{reset}	3	–	–	μs	–

DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL PUENTE H



CÓDIGO DEL PROGRAMA

```
#include <PID_v1.h>

#include <AFMotor.h>

#include "Wire.h"

#include "I2Cdev.h"

#include "MPU6050.h"


AF_DCMotor motor3(3);

AF_DCMotor motor4(4);


MPU6050 accelgyro;


Kalman kalmanX; // Create the Kalman instances

Kalman kalmanY;


int16_t ax, ay, az;

int16_t gx, gy, gz;

int Motor,power;

float AcY,GyY;

double Setpoint, Input, Output;

//double min_out=-255;

//double max_out=255;

float Tu=0.09;
```

```
float Kp=1.6;
```

```
float Ki=0.2;//2.4;//2.0*Kp/Tu;//5.4;
```

```
float Kd=0.0052;//0.0052;//Kp*Tu/8.0;//0.0052;
```

```
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint,Kp,Ki,Kd, DIRECT);
```

```
#define A_R 16384.0
```

```
#define G_R 131.0
```

```
//Conversion de radianes a grados 180/PI
```

```
#define RAD_A_DEG = 57.295779
```

```
#define LED_PIN 13
```

```
bool blinkState = false;
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
    Wire.begin();
```

```
    Serial.begin(9600);
```

```
    Setpoint = 7.0;
```

```
    Motor = 0;
```

```
    accelgyro.initialize();
```

```
pinMode(LED_PIN, OUTPUT);

myPID.SetMode(AUTOMATIC);

myPID.SetOutputLimits(-30,30); //(MIN,MAX)

myPID.SetSampleTime(sampleRate);


motor3.run(RELEASE);

motor4.run(RELEASE);


timer = micros();
}


void loop()
{
    accelgyro.getMotion6(&ay, &gy,);

    double dt = 0.01;

    AcY=atan(-1*(ax/A_R)/sqrt(pow((ay/A_R),2) +
pow((az/A_R),2)))*RAD_TO_DEG;

    //Calculo del angulo del Giroscopio

    GyY = gy/G_R;

    //Aplicar el Filtro Complementario
```

```
AngleY = 0.93 * (AngleY + GyY * dt) + 0.07 * AcY;
```

```
Input = (double)AngleY;
```

```
myPID.Compute();
```

```
Motor = (int)Output;
```

```
Serial.print(AcY); Serial.print("A"); //Green
```

```
Serial.print(GyY); Serial.print("B"); //Blue
```

```
Serial.print(AngleY); Serial.print("C");//Red
```

```
power = abs(Motor);
```

```
power = (int)(55.0 + (power * ((200.0-55.0) / 30.0)));
```

```
if (Motor<0)
```

```
{
```

```
    motor3.run(BACKWARD);
```

```
    motor4.run(BACKWARD);
```

```
    motor3.setSpeed(power*1.2);
```

```
    motor4.setSpeed(power*1.1);
```

```
}
```

```
else // if(Motor>0)
```


```
{
```

```
    motor3.run(FORWARD);
```

```
    motor4.run(FORWARD);
```

```
    motor3.setSpeed(power*1.2);  
    motor4.setSpeed(power*1.1);  
}  
blinkState = !blinkState;  
digitalWrite(LED_PIN, blinkState);  
//delay(35);  
}
```

MPU6050

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-02 Revision: 3.1 Release Date: 10/24/2011
---	--	---

5 Features

5.1 Gyroscope Features

The triple-axis MEMS gyroscope in the MPU-60X0 includes a wide range of features:

- Digital-output X-, Y-, and Z-Axis angular rate sensors (gyroscopes) with a user-programmable full-scale range of ± 250 , ± 500 , ± 1000 , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$
- External sync signal connected to the FSYNC pin supports image, video and GPS synchronization
- Integrated 16-bit ADCs enable simultaneous sampling of gyros
- Enhanced bias and sensitivity temperature stability reduces the need for user calibration
- Improved low-frequency noise performance
- Digitally-programmable low-pass filter
- Gyroscope operating current: 3.6mA
- Standby current: 5 μ A
- Factory calibrated sensitivity scale factor

5.2 Accelerometer Features


The triple-axis MEMS accelerometer in MPU-60X0 includes a wide range of features:

- Digital-output triple-axis accelerometer with a programmable full scale range of $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ and $\pm 16g$
- Integrated 16-bit ADCs enable simultaneous sampling of accelerometers while requiring no external multiplexer
- Accelerometer normal operating current: 500 μ A
- Low power accelerometer mode current: 10 μ A at 1.25Hz, 20 μ A at 5Hz, 60 μ A at 20Hz, 110 μ A at 40Hz
- Orientation detection and signaling
- Tap detection
- User-programmable interrupts
- Free-fall interrupt
- High-G interrupt
- Zero Motion/Motion interrupt
- User self-test

5.3 Additional Features

The MPU-60X0 includes the following additional features:

- 9-Axis MotionFusion by the on-chip Digital Motion Processor (DMP)
- Auxiliary master I²C bus for reading data from external sensors (e.g., magnetometer)
- 3.9mA operating current when all 6 motion sensing axes and the DMP are enabled
- VDD supply voltage range of 2.375V-3.46V
- Flexible VLOGIC reference voltage supports multiple I²C interface voltages (MPU-6050 only)
- Smallest and thinnest QFN package for portable devices: 4x4x0.9mm
- Minimal cross-axis sensitivity between the accelerometer and gyroscope axes
- 1024 byte FIFO buffer reduces power consumption by allowing host processor to read the data in bursts and then go into a low-power mode as the MPU collects more data
- Digital-output temperature sensor
- User-programmable digital filters for gyroscope, accelerometer, and temp sensor
- 10,000 g shock tolerant
- 400kHz Fast Mode I²C for communicating with all registers
- 1MHz SPI serial interface for communicating with all registers (MPU-6000 only)

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-20 Revision: 3.1 Release Date: 10/24/2011
---	---	---


- 20MHz SPI serial interface for reading sensor and interrupt registers (MPU-6000 only)
- MEMS structure hermetically sealed and bonded at wafer level
- RoHS and Green compliant

5.4 MotionProcessing

- Internal Digital Motion Processing™ (DMP™) engine supports 3D MotionProcessing and gesture recognition algorithms
- The MPU-60X0 collects gyroscope and accelerometer data while synchronizing data sampling at a user defined rate. The total dataset obtained by the MPU-60X0 includes 3-Axis gyroscope data, 3-Axis accelerometer data, and temperature data. The MPU's calculated output to the system processor can also include heading data from a digital 3-axis third party magnetometer.
- The FIFO buffers the complete data set, reducing timing requirements on the system processor by allowing the processor burst read the FIFO data. After burst reading the FIFO data, the system processor can save power by entering a low-power sleep mode while the MPU collects more data.
- Programmable interrupt supports features such as gesture recognition, panning, zooming, scrolling, zero-motion detection, tap detection, and shake detection.
- Digitally-programmable low-pass filters
- Low-power pedometer functionality allows the host processor to sleep while the DMP maintains the step count

5.5 Clocking

- On-chip timing generator $\pm 1\%$ frequency variation over full temperature range
- Optional external clock inputs of 32.768kHz or 19.2MHz


	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.1 Release Date: 10/24/2011
---	---	---

6 Electrical Characteristics

6.1 Gyroscope Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_a = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
GYROSCOPE SENSITIVITY Full-Scale Range Gyroscope ADC Word Length Sensitivity Scale Factor Sensitivity Scale Factor Tolerance Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature Nonlinearity Cross-Axis Sensitivity	FS_SEL=0		±256		°/s	
	FS_SEL=1		±512		°/s	
	FS_SEL=2		±1024		°/s	
	FS_SEL=3		±2048		°/s	
	FS_SEL=0		16		bits	
	FS_SEL=1		131		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=2		65.5		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=3		32.8		LSB/(°/s)	
	25°C	-3	16.4	+3	LSB/(°/s)	
	Best fit straight line, 25°C		±0.2		%	
GYROSCOPE ZERO-RATE OUTPUT (ZRO) Initial ZRO Tolerance ZRO Variation Over Temperature Power-Supply Sensitivity (1-10Hz) Power-Supply Sensitivity (10-250Hz) Power-Supply Sensitivity (250Hz-1000Hz) Linear Acceleration Sensitivity	25°C		±20		°/s	
	-40°C to +85°C		±20		°/s	
	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		4		°/s	
	Static		0.1		°/s/g	
	Static		0.1		°/s/g	
GYROSCOPE NOISE PERFORMANCE Total RMS Noise Low-frequency RMS noise Rate Noise Spectral Density	FS_SEL=0		0.05		°/s-rms	
	DLPF_CFG=2 (100Hz)		0.033		°/s-rms	
	Bandwidth 1Hz to 10Hz		0.003		°/s/√Hz	
	At 10Hz		0.003		°/s/√Hz	
GYROSCOPE MECHANICAL FREQUENCIES X-Axis Y-Axis Z-Axis		30	33	36	kHz	
		27	30	33	kHz	
		24	27	30	kHz	
LOW PASS FILTER RESPONSE Programmable Range		8		155	Hz	
OUTPUT DATA RATE Programmable		4		8,000	Hz	
GYROSCOPE START-UP TIME ZRO Settling			30		ms	

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.1 Release Date: 05/24/2011
---	---	---

6.2 Accelerometer SpecificationsVDD = 2.375V-3.48V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.5V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
ACCELEROMETER SENSITIVITY						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g	
	AFS_SEL=1		±4		g	
	AFS_SEL=2		±8		g	
	AFS_SEL=3		±16		g	
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	
Initial Calibration Tolerance			±3		%	
Sensitivity Change vs. Temperature	AFS_SEL=0, -40°C to +85°C		±0.02		%/°C	
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.5		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
ZERO-G OUTPUT						
Initial Calibration Tolerance	X and Y axes		±50		mg	
	Z axis		±50		mg	
Zero-g Level Change vs. Temperature	X and Y axes, 0°C to +70°C		±15		mg	
	Z axis, 0°C to +70°C		±50		mg	
SELF TEST RESPONSE			0.5		g	
NOISE PERFORMANCE						
Power Spectral Density	@ 10Hz, AFS_SEL=0 & GDR=1kHz		400		µg/√Hz	
LOW PASS FILTER RESPONSE						
	Programmable Range	5		250	Hz	
OUTPUT DATA RATE						
	Programmable Range	4		1,000	Hz	
INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT			1		mg/LSB	


1. Typical zero-g initial calibration tolerance value after MSL3 preconditioning

InvenSense	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.1 Release Date: 10/24/2011
-------------------	--	---

6.3 Electrical and Other Common Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, TA = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
TEMPERATURE SENSOR						
Range	Unstressed		-40 to +85		°C	
Sensitivity	35°C		340		LSB/°C	
Temperature Offset	Best fit straight line (-40°C to +85°C)		-521		LSB	
Linearity			±1		°C	
VDD POWER SUPPLY						
Operating Voltage:		2.375		3.46	V	
Normal Operating Current	Gyroscope + Accelerometer + DMP		3.9		mA	
	Gyroscope + Accelerometer (DMP disabled)		3.8		mA	
	Gyroscope + DMP (Accelerometer disabled)		3.7		mA	
	Gyroscope only (DMP & Accelerometer disabled)		3.6		mA	
	Accelerometer only (DMP & Gyroscope disabled)		500		µA	
Accelerometer Low Power Mode Current	1.25 Hz update rate		10		µA	
	5 Hz update rate		20		µA	
	20 Hz update rate		60		µA	
	40 Hz update rate		110		µA	
Full-Grip (Idle Mode) Supply Current			5		µA	
Power Supply Ramp Rate	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 93% of the final value		5	100	ms	
VLOGIC REFERENCE VOLTAGE	MPU-6050 only					
Voltage Range	VLOGIC must be >VDD at all times	1.71		VDD	V	
Power Supply Ramp Rate	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 93% of the final value			1	ms	
Normal Operating Current			100		µA	
START-UP TIME FOR REGISTER READ/WRITE			20	100	µs	
TEMPERATURE RANGE						
Specified Temperature Range	Performance parameters are not applicable beyond Specified Temperature Range	-43		+85	°C	

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: ES-MPU-6000A-02 Revision: 2.1 Release Date: 10/24/2011
---	---	---

6.4 Electrical Specifications, Continued

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.5V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
SERIAL INTERFACE						
I ² C Operating Frequency, All Registers Read/Write	MPU-6000 only, Low-Speed Characterization		100 ±10%		kHz	
	MPU-6050 only, High-Speed Characterization		1 ±10%		MHz	
I ² C Operating Frequency, Sensor and Interrupt Registers Read Only	MPU-6000 only		20 ±10%		MHz	
I ² C Operating Frequency	All registers, Fastmode			400	kHz	
	All registers, Standard-mode			100	kHz	
I²C ADDRESS						
	ADD = 0		1101000			
	ADD = 1		1101001			
DIGITAL INPUTS (SDA, SCL, FSYNC, IC8, CLKIN)						
V _{IL} , High-Level Input Voltage	MPU-6000	0.7VDD			V	
	MPU-6050	0.7VLOGIC			V	
V _{OL} , Low-Level Input Voltage	MPU-6000			0.3VDD	V	
	MPU-6050			0.3VLOGIC	V	
C _i , Input Capacitance			≤ 5		pF	
DIGITAL OUTPUT (ADD, INT)						
V _{OH} , High-Level Output Voltage	R _{LOAD} = 1MΩ; MPU-6000	0.9VDD			V	
	R _{LOAD} = 1MΩ; MPU-6050	0.9VLOGIC			V	
V _{OL} , LOW-Level Output Voltage	R _{LOAD} = 1MΩ; MPU-6000			0.1VDD	V	
	R _{LOAD} = 1MΩ; MPU-6050			0.1VLOGIC	V	
V _{OL(max)} , INT Low-Level Output Voltage	OPEN = 1, 0.3mA sink current			0.1	V	
I _{OL} , Output Leakage Current	OPEN = 1		100		nA	
t _{PLH} , INT Pulse Width	LATCH_INT_EN = 0		50		μs	
DIGITAL OUTPUT (CLKOUT)						
V _{OH} , High-Level Output Voltage	R _{LOAD} = 1MΩ	0.9VDD			V	
V _{OL} , LOW-Level Output Voltage	R _{LOAD} = 1MΩ			0.1VDD	V	